



DISERTASI - TE 143597

**PENJADWALAN DAN PEMBEBANAN OPTIMUM
DISTRIBUTED GENERATION PADA SISTEM DISTRIBUSI
RADIAL TIDAK SEIMBANG MENGGUNAKAN METODE
QUANTUM EVOLUTIONARY**

NI KETUT ARYANI

NRP: 07111060010019

DOSEN PEMBIMBING :

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.

Dr. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

PROGRAM DOKTOR

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2018



DISERTASI - TE 143597

**PENJADWALAN DAN PEMBEBANAN
OPTIMUM DISTRIBUTED GENERATION
PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL TIDAK
SEIMBANG MENGGUNAKAN METODE
QUANTUM EVOLUTIONARY**

**NI KETUT ARYANI
NRP: 07111060010019**

**DOSEN PEMBIMBING :
Prof.Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**

**PROGRAM DOKTOR
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan disertasi saya dengan judul **“Penjadwalan dan Pembebanan Optimum Distributed Generation pada Sistem Distribusi Radial Tidak Seimbang menggunakan Metode Quantum Evolutionary”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, Februari 2018



Ni Ketut Aryani

NRP. 07111060010019

LEMBAR PENGESAHAN

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Doktor (Dr)

Di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Ni Ketut Aryani

07111060010019


Tanggal Ujian : 21 Februari 2018

Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.

NIP. 1964041990021001

 (Pembimbing I)

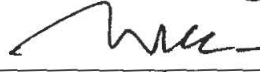
Dr. I Made Yulistya N., ST. M.Sc.

NIP. 197007121998021001

 (Pembimbing II)

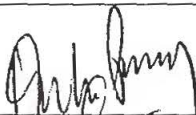
Prof. Dr. Ir. H. Najamuddin Harun, M.Sc

NIP. 194308101968071001

 (Penguji I)

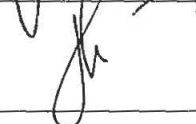
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.PhD.

NIP. 194907151974121001

 (Penguji II)

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

NIP : 1974 11 29 2000 12 1001

 (Penguji III)

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknologi Elektro




Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.

NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENJADWALAN DAN PEMBEBANAN OPTIMUM DISTRIBUTED
GENERATION PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL TIDAK
SEIMBANG MENGGUNAKAN METODE QUANTUM
EVOLUTIONARY.**

Nama Mahasiswa : Ni Ketut Aryani
NRP : 07111060010019
Pembimbing : Prof. Dr.Ir.Adi Soeprijanto,M.T.
Co-Pembimbing : Dr. I Made Yulistya Negara, ST.,M.Eng.

ABSTRAK

Masalah utama pada sistem distribusi adalah ketidak seimbangan beban pada setiap fasenya. Sehingga setiap fasa harus mensuplai daya yang berbeda. Disertasi ini menyajikan suatu metode untuk melakukan penjadwalan dan pembebanan yang optimal dari berbagai pembangkit kecil terdistribusi (DG) yang terhubung pada sistem distribusi radial yang tidak seimbang (*unbalance radial distribution system*). Tujuannya adalah untuk meminimalkan biaya pembangkitan energi listrik dengan tetap memperhatikan batasan-batasan dari setiap unit pembangkit seperti *kapasitas minimum dan maksimum, maximum ramp rate, minimum uptime* dan *downtime*.

Penelitian ini menggunakan metode QEA untuk menyelesaikan masalah penjadwalan pembebanan unit pembangkit pada sistem distribusi yang tidak seimbang. Metode QEA didasarkan pada konsep dan prinsip komputasi kuantum, seperti bit kuantum, gerbang rotasi dan superposisi state. QEA menggunakan representasi bit kuantum, yang memiliki keanekaragaman populasi yang lebih baik dibandingkan dengan representasi lain yang digunakan dalam algoritma evolusioner dan menggunakan gerbang quantum untuk mendorong populasi menuju solusi terbaik. Mekanisme QEA secara cerdas memperlakukan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi dan juga mencapai solusi yang lebih baik, bahkan dengan populasi kecil. Metode ini diterapkan pada sistem distribusi radial tidak seimbang IEEE 15 bus yang dimodifikasi untuk penjadwalan selama 24 jam.

Efektivitas pendekatan yang diusulkan divalidasi dengan membandingkan biaya pembangkitan tanpa DG. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa metode QEA adalah pendekatan yang menjanjikan untuk memecahkan masalah unit commitment.

Kata kunci : *distributed generation, unit commitment, power flow, metoda Quantum Evolutionary*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**OPTIMUM SCHEDULING AND SIZING OF DISTRIBUTED
GENERATIONS IN UNBALANCE RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM
BASED ON QUANTUM EVOLUTIONARY ALGORITHM.**

Name : Ni Ketut Aryani
Student ID : 07111060010019
Sepervisor : Prof. Dr.Ir.Adi Soeprijanto,M.T.
: Dr. I Made Yulistya Negara, ST.,M.Eng.

ABSTRACT

Unbalances are serious problems in distribution systems. Non-uniform loads in the phases result in the requirements of supplying each phase with different amounts of power.

This work presents a method for the optimum scheduling and sizing of various distributed generators (DGs) in unbalanced radial distributed systems. Though targeting the minimum overall generation cost, this method still takes into account respective constraints imposed by every generator for instances, maximum ramp-rate, minimum uptime and downtime.

The method exploits Quantum Evolutionary Algorithm (QEA), an Evolutionary Algorithm that runs on a Quantum Computing System.

QEA works based on the principles and concepts of the Quantum Computing, which is based on qubits, rotation gates and states of superpositions. QEA uses qubits, which promote population variety better than the one provided by conventional computing system. QEA uses quantum gates to push the population through the evolution to the optimum solution. QEA intelligently balances between exploitation and exploration and thence yields better results even by using smaller population.

The method is applied to the 15 bus IEEE unbalanced radial distribution network for the 24 hour scheduling scheme.

The effectiveness of the proposed method is confirmed by comparing the generation cost achieved against the one obtained from the case when all DGs are off. The test result also reveals that the QEA based method is a promising approach for solving unit commitment problems.

Keywords: distributed generation, unit commitment, power-flow, quantum evolutionary algorithm.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan, atas berkatnya Nya kami dapat menyelesaikan disertasi program doktor ini. Kami menyadari bahwa selama penulisan disertasi ini banyak pihak yang telah memberikan bantuannya, sehingga pada kesempatan ini kami ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Prof. DR. Ir. Adi Soeprijanto, M.T. selaku Promotor yang telah memberikan bimbingan, saran, dorongan semangat dengan tulus dan penuh kesabaran juga sering mengingatkan untuk segera menyelesaikan program doktor.
2. Bapak Dr. I Made Yulistya N., ST. M.Sc. selaku Co-Promotor yang telah memberikan bimbingan, saran, koreksi tulisan, serta dorongan semangat dengan tulus dan penuh kesabaran.
3. Bapak Prof.Dr. Ir.H. Najamuddin Harun, M.Sc, sebagai dosen penguji yang telah memberikan masukan dan saran dalam rangka penyempurnaan buku disertasi.
4. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.PhD sebagai kepala lab PSSSL, dosen penguji dan tempat penulis bertanya, yang dengan tulus dan sabar memberikan bimbingan selama penulis mengerjakan disertasi.
5. Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.sebagai dosen penguji dan teman di lab PSSSL yang selalu memberikan dorongan semangat untuk penulis bisa menyelesaikan disertasi.
6. Teman-teman dosen dan karyawan di Departemen Teknik Elektro ITS yang selalu membantu dan memberikan dorongan semangat.
7. Yang tercinta orang tua Ni Nyoman Masih dan Mirlani Wiguno, yang terus memberikan support dan doanya.
8. Suami (Bernarto) dan anak-anak tercinta (Rahmat dan Harun) yang dengan tulus telah memberikan dukungan, doa, pengertian dan kesabaran.
9. Kakak dan adik penulis terutama untuk Gede dan Ayu yang dengan tulus memberikan bantuan, dukungan dan doanya.
10. Pak Syai'in, Bapak Suyanto, Bapak Uman Teman-teman S3 di lab PSSSL yang telah banyak memberikan bantuan dan teman diskusi.
11. Adik-adik mahasiswa asisten lab PSSSL yang telah memberikan bantuan dalam mengerjakan buku disertasi.
12. Pihak-pihak lain yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu dan telah memberikan bantuan dan doanya selama ini.

Penulis sadar bahwa sebagai manusia biasa, kami memiliki keterbatasan dan kekurangan sehingga karya tulis ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran dan kritik yang membangun akan kami terima dengan tangan terbuka.

Surabaya, 12 Februari 2018

Ni Ketut Aryani

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Kontribusi Penelitian.....	9
1.5 Batasan Masalah.....	10
1.6 Riset yang Menunjang Disertasi.....	10
1.7 Roadmap Penelitian dan Penelitian Sebelumnya	11
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	17
2.1 Telaah Pustaka.....	17
2.2 Distributed Generation (DG)	19
2.2.1 Teknologi DG.....	24
2.2.2 Panel Surya (Photovoltaic/PV).....	25
2.2.3 Turbin Angin (Wind Turbine/WT)	26
2.2.4 Turbin Mikro (Micro Turbine/MT).....	27
2.2.5 Manfaat DG.....	28
2.3 Dampak DG Pada Sistem	29
2.4 Komponen Interkoneksi DG.....	32

2.5 Keuntungan DG sebagai Sumber Energi	34
2.6 Sistem Distribusi	34
2.7 Studi Aliran Daya (<i>Power Flow Study</i>)	41
2.8 Teori Unit Commitment	44
2.9 Teori Metode Quantum Evolutionary (QEA)	46
BAB III. PENJADWALAN DAN PEMBEBANAN PEMBANGKIT	51
3.1 Tahapan Penelitian	51
3.2 Studi Literatur	51
3.3 Unit Commitment pada Sistem Distribusi dengan DG	53
3.3.1 Model Panel Surya (PV)	54
3.3.2 Model Turbin Angin (WT)	54
3.3.3 Model Turbin Mikro (MT)	54
3.3.4 Model Baterai (Energy Storage System/ESS)	55
3.4 Studi Aliran Daya Tiga Fasa yang Tidak Seimbang	56
3.4.1 Model Generator Urutan	56
3.4.2 Model Transformator Urutan	57
3.4.3 Model Saluran Transmisi Urutan	57
3.4.4 Metode Aliran Daya Komponen Urutan	59
3.5 Formulasi Unit Commitment	65
BAB IV. SIMULASI DAN PEMBAHASAN	69
4.1 Data Pembangkit, Saluran, Beban dan Parameter QEA	75
4.2 Hasil Simulasi dan Analisa	82
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	105
DAFTAR PUSTAKA	107
LAMPIRAN (Paper Penunjang Disertasi)	113

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Road map penelitian dan penelitian sebelumnya	13
Gambar 2.1	Pembangkit tersebar (DG) dan pembangkit terpusat	19
Gambar 2.2	Panel Surya (PV)	26
Gambar 2.3	Pembangkit Tenaga Angin (WT)	26
Gambar 2.4	Turbin Mikro (MT)	27
Gambar 2.5	Microgrid dan Beban yang Terhubung pada Grid Distribusi... ..	32
Gambar 2.6	Komponen Saluran Distribusi Sekunder	37
Gambar 2.7	Jaringan Distribusi Radial Tipe Pohon.....	39
Gambar 2.8	Jaringan Distribusi Radial dengan Tie dan Switch Pemisah... ..	40
Gambar 2.9	Jaringan Distribusi Radial Tipe Pusat Beban	40
Gambar 2.10	Jaringan Distribusi Radial dengan Fasa Area	41
Gambar 2.11	Dasar dari quantum bit (qubit)	49
Gambar 3.1	Diagram alir metodologi penulisan disertasi.....	52
Gambar 3.2	Model generator komponen urutan	56
Gambar 3.3	Model saluran coupled urutan \.....	58
Gambar 3.4	Model saluran decoupled urutan	60
Gambar 3.5	Diagram alir studi aliran daya metoda Newton Raphson urutan positif, negative dan nol.....	65
Gambar 4.1	Diagram alir penjadwalan dan pembebanan DG.....	73
Gambar 4.2	Single line diagram sistem distribusi radial	75
Gambar 4.3	Grafik beban fasa dan DG energi terbarukan.....	81
Gambar 4.4	Grafik fungsi fitness	87
Gambar 4.5	Beban fasa R dan pembebanan Grid dan pembangkit.....	91
Gambar 4.7	Beban fasa S dan pembebanan Grid dan dan pembangkit	92

Gambar 4.7	Beban fasa T dan pembebanan Grid dan dan pembangkit	92
Gambar 4.8	Tegangan bus 10 fasa.....	97
Gambar 4.9	Tegangan bus fasa R saat beban puncak.....	97
Gambar 4.10	Tegangan bus fasa S saat beban puncak.....	98
Gambar 4.11	Tegangan bus fasa T saat beban puncak.....	98
Gambar 4.12	Rugi daya fasa R sebelum dan sesudah DG dipasang	100
Gambar 4.13	Rugi daya fasa S sebelum dan sesudah DG dipasang.....	100
Gambar 4.14	Rugi daya fasa T sebelum dan sesudah DG dipasang	101
Gambar 4.15	Rugi daya fasa T sebelum dan sesudah DG dipasang	104

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Daftar Publikasi Peneliti	13
Tabel 1.2	Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai <i>placement</i> dan <i>sizing</i> DG ..	15
Tabel 1.3	Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai <i>Economic Dispatch</i>	15
Tabel 1.4	Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai <i>Unit Commitment</i>	15
Tabel 1.5	Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai <i>Unit Commitment</i> pada <i>Microgrid</i>	16
Tabel 2.1	Rating DG	22
Tabel 2.2	Klasifikasi DG berdasar Teknologi Pembangkitan.....	25
Tabel 4.1	Data bus sistem distribusi	77
Tabel 4.2	Data saluran distribusi (fasa R,S,T.....	77
Table 4.3	Batas operasi dari pembangkit	78
Tabel 4.4	Koefisien biaya dari pembangkit	78
Tabel 4.5	Data beban selama selama 24 jam	79
Tabel 4.6	Beban dan daya DG energi terbarukan	80
Tabel 4.7	Data parameter QEA dan Power Flow	81
Tabel 4.8	Profile tegangan (p.u) fasa R tanpa DG	82
Tabel 4.9	Profile tegangan (p.u) fasa S tanpa DG.....	83
Tabel 4.10	Profile tegangan (p.u) fasaT tanpa DG	84
Tabel 4.11	Beban, rugi-rugi dan daya dari grid fasa R tanpa DG.....	85
Tabel 4.12	Daya yang dibangkitkan oleh turbin mikro dan Grid	88
Tabel 4.13	Pembebanan Fasa R beban tidak seimbang	89
Tabel 4.14	Pembebanan Fasa S beban tidak seimbang.....	90
Tabel 4.15	Pembebanan Fasa T beban tidak seimbang.....	91
Tabel 4.16	Beban, rugi-rugi dan daya pada sistem dengan DG.....	93

Tabel 4.17	Profile tegangan (p.u) bus fasa R dengan DG, beban tidak seimbang	94
Tabel 4.18	Profile tegangan (p.u) bus fasa S dengan DG, beban tidak seimbang	95
Tabel 4.19	Profile tegangan (p.u) bus fasa T dengan DG, beban tidak seimbang	96
Tabel 4.20	Perbandingan rugi-rugi daya dengan DG dan tanpa DG	99
Tabel 4.21	Pembebanan Fasa R beban seimbang	102
Tabel 4.22	Pembebanan Fasa S beban seimbang	102
Tabel 4.23	Pembebanan Fasa T beban seimbang	103
Tabel 4.24	Tegangan bus fasa R,S dan T pada beban seimbang	104

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan daya listrik semakin meningkat seiring dengan peningkatan kebutuhan daya listrik pada sisi beban. Pembangkit konvensional sering kali kurang fleksibel dalam memenuhi kebutuhan energi listrik terutama untuk daerah-daerah terpencil atau pada sistem distribusi jika jaringan utama mengalami gangguan. Pemasangan pembangkit skala kecil didekat beban dapat menjadi solusi untuk masalah tersebut. Pembangkit dengan kapasitas kecil yang tersebar dan terhubung dengan jaringan distribusi secara umum disebut *distributed generation (DG)* adalah sumber daya alternatif untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

Saat ini jaringan energi tradisional telah menghadapi evolusi bertahap dari jaringan terpusat untuk jaringan terdistribusi dan lokal, di mana smartgrid dan microgrids telah muncul dan memainkan peran penting dalam jaringan utama di seluruh dunia. Microgrid adalah jaringan terdistribusi lokal tegangan rendah, yang mampu mengelola operasi sendiri dengan sistem kontrol cerdas. Hal ini dapat beroperasi sebagai bagian dari jaringan utama, yang dikenal sebagai mode terkoneksi (*interconnected mode*) atau sebagai sebuah sistem yang terisolasi, terpisah dari jaringan utama yang dikenal sebagai *island mode*. Selain itu, microgrid memiliki berbagai sumber energi, termasuk sumber-sumber energi terbarukan, yang dapat mensuplai daya ke jaringan utama. Oleh karena itu, microgrid dapat diperlakukan sebagai entitas tunggal beban dikendalikan dalam sistem sebagai sumber cerdas mendukung jaringan utama. Karena sistem kontrol lokal cerdas dan sumber yang terbarukan, microgrid mampu menyediakan energi dengan kualitas tinggi dan dapat diandalkan ke konsumen dengan biaya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan pembangkit konvensional dan dengan emisi karbon yang lebih sedikit.

Dengan adanya smartgrid dan microgrid, DG memegang peranan yang sangat penting untuk memenuhi kebutuhan daya. DG telah menjadi perhatian dunia karena begitu banyak keunggulan yang ditawarkan dibandingkan dengan

pembangkit yang terpusat. Pada umumnya DG adalah sumber energi terbarukan dengan kapasitas yang relatif kecil.

Kekhawatiran dari aspek ekonomis dan pencemaran lingkungan turut memberikan dorongan untuk peningkatan pengembangan yang mendukung pemanfaatan pembangkit skala kecil. Dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalkan dengan mengupayakan untuk menghasilkan energi listrik dari sumber energi terbarukan (*renewable energi*). Pemanfaatan sumber energi listrik terbarukan berkembang sangat pesat di seluruh dunia. Dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan polusi terhadap lingkungan dapat diminimalkan, biaya pembangkitan yang lebih murah dan mempunyai potensi pembangkitan yang tinggi.

Pemanfaatan pembangkit yang tersebar (DG) memiliki beberapa keunggulan dalam hal ekonomi, lingkungan dan teknis [1-3].

Keunggulan dari segi ekonomi adalah biaya distribusi dan transmisi yang lebih rendah, harga listrik menjadi lebih murah dan penghematan bahan bakar fosil.

Keunggulan dari segi lingkungan adalah emisi gas dan polusi suara lebih rendah. Sebagai contoh, turbin generator DG bahan bakar gas alam melepaskan kurang dari seperempat dari emisi sulfur dioksida (SO₂), kurang dari 1/100 dari oksida nitrogen (NO_x), dan 40% kurang karbon dioksida (CO₂) dibanding boiler pembangkit listrik batu bara baru; unit jenis turbin generator DG bahan bakar gas alam cukup bersih untuk dapat diletakkan dalam suatu komunitas di antara perumahan dan bangunan komersial.

Keunggulan dari segi teknis mencakup berbagai jenis manfaat yaitu rugi-rugi saluran lebih kecil karena letaknya dekat dengan pusat beban/konsumen, profil tegangan sistem lebih baik dan keandalan sistem semakin baik.

Secara umum DG yang terhubung pada sistem distribusi terhubung juga dengan pembangkit konvensional. Namun DG juga dapat bekerja secara mandiri memberikan daya kepada beban di sekitarnya jika sistem utama mengalami gangguan.

Dalam perencanaan sistem tenaga listrik yang melibatkan DG, beberapa faktor yang perlu diperhatikan antara lain teknologi atau metode terbaik yang digunakan, jumlah dan kapasitas unit DG, lokasi terbaik, cara koneksi jaringan,

koordinasi penyaluran daya dengan pembangkit konvensional dan dengan baterai. Pemanfaatan DG untuk sebagai sumber energi sudah banyak dibahas dalam penelitian-penelitian sebelumnya [4-12].

Menentukan lokasi dan besar kapasitas DG yang tepat pada jaringan distribusi, dapat mengurangi rugi-rugi saluran dan meningkatkan kualitas daya (*power quality*). Rugi daya saluran berkurang karena DG terletak pada jaringan distribusi, sehingga jarak sumber energi dengan beban menjadi lebih dekat.

Pada saat beban meningkat, tegangan pada bus akan turun. DG berfungsi sebagai sumber daya listrik. Dengan semakin besarnya daya yang diterima akan menyebabkan terjadinya peningkatan tegangan pada ujung saluran.

Pemanfaatan DG juga dapat meningkatkan keandalan sistem. Jika pembangkit utama mengalami gangguan (*outage*), DG dapat menyalurkan daya ke beban, sehingga pemutusan beban dapat dihindari. DG dapat bekerja secara mandiri maupun bersama dengan pembangkit lain untuk suplai daya ke beban sekitarnya.

DG umumnya terhubung pada jaringan tegangan rendah atau pada grid jaringan distribusi. Adapun permasalahan pada jaringan distribusi adalah ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan pada jaringan distribusi ini terjadi karena beban satu fasa pada sisi pelanggan selalu berubah. Ketidakseimbangan beban ini mengakibatkan arus mengalir pada netral transformator. Arus yang mengalir pada netral transformator ini menyebabkan terjadinya rugi daya. Penempatan DG pada bus yang tepat dapat mengurangi ketidakseimbangan beban dan dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran [4-12].

Aliran daya merupakan pedoman penting dalam perencanaan sistem tenaga dan studi operasional. Tujuan dari aliran daya adalah :

1. Mengetahui tegangan-tegangan pada setiap bus yang ada dalam sistem, baik magnitudo maupun sudut fasa tegangan.
2. Mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran.
3. Mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan.
4. Memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.

5. Memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya seperti studi hubung singkat, stabilitas dan pembebanan ekonomis.

Dalam beberapa kasus, solusinya studi aliran daya dapat dilakukan pendekatan dengan aliran daya satu fasa. Ada beberapa metoda umum yang dapat digunakan untuk menyelesaikan studi aliran daya satu fasa antara lain metoda Metoda Gauss Seidel, Newton Raphson, Fast Decoupled [13-15]

Namun terdapat banyak kasus dimana ketidak seimbangan sistem tidak dapat diabaikan karena ketidak seimbangan beban, jaringan transmisi yang tidak ditransposisi, kombinasi seimbang dengan jaringan yang tidak seimbang pada sistem distribusi. Oleh karena itu, perhitungan aliran daya tiga fasa yang berhubungan dengan sistem daya yang tidak seimbang digunakan sebagai alat analisis.

Untuk menghitung rugi-rugi daya saluran dan tegangan bus, perhitungan aliran daya untuk sistem yang tidak seimbang menggunakan metoda Newton Raphson dengan komponen urutan yang dikembangkan oleh Mamdouh Abdel-Akher digunakan dalam penelitian ini [16][17].

Isu yang sangat penting dalam industri tenaga listrik adalah bagaimana mengoperasikan sistem tenaga listrik yang efisien dan ekonomis. Target utama industri pembangkit listrik adalah mencapai biaya pembangkitan yang optimum dengan tetap memperhatikan batasan sistem dan unit pembangkit. Ini merupakan keunggulan pemanfaatan DG dalam bidang ekonomi. Dengan menempatkan DG dekat dengan pusat beban, dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran. Sehingga daya yang harus dibangkitkan oleh pembangkit konvensional menjadi lebih rendah.

Pada pengoperasian pembangkit tenaga listrik, pemakaian bahan bakar menjadi salah satu hal yang perlu mendapat perhatian khusus karena sekitar 60% dari total biaya operasi yang dikeluarkan merupakan biaya bahan bakar [13]. Output pembangkit yang dihasilkan selalu diupayakan agar sama dengan besar kebutuhan di sisi beban, karena perubahan kebutuhan energi listrik di sisi beban akan menimbulkan fluktuasi biaya bahan bakar. Korelasi antara keduanya dinyatakan dalam karakteristik input output pembangkit tenaga listrik. Analisis untuk meminimalkan biaya pembangkitan biasa disebut dengan istilah *Economic Dispatch*. Economic dispatch adalah pembagian pembebanan pada unit-unit

pembangkit yang ada dalam sistem secara optimal ekonomis pada harga beban sistem tertentu. Dengan penerapan economic dispatch maka akan didapatkan biaya pembangkitan yang minimum terhadap produksi daya listrik yang dibangkitkan unit-unit pembangkit pada suatu sistem kelistrikan

Dalam pembebanan pembangkit, ada beberapa batasan *equality* dan *inequality* yang harus dipenuhi setiap unit pembangkit. Batasan *equality* menunjukkan keseimbangan antara total daya yang dibangkitkan dengan total daya beban pada sistem. Batasan *inequality* mencerminkan batas minimum dan maksimum pembangkitan yang harus dipenuhi sehingga diperoleh total biaya pembangkitan yang optimum.

Solusi dari masalah economic dispatch dengan berbagai metode, baik secara deterministik maupun undeterministik telah menjadi perhatian para peneliti sejak lama. Pendekatan deterministik berdasarkan pada cabang ilmu matematika teknik sedangkan pendekatan undeterministik bersifat heuristik menggunakan teknik probabilitas. Contoh solusi deterministik dalam masalah economic dispatch misalnya menggunakan metode lagrange, iterasi lamda dan base point [13][14], sedangkan solusi undeterministik masalah economic dispatch berdasarkan pendekatan heuristik misalnya menggunakan Hybrid Chaotic Particle Swarm Optimizer [19], Particle Swarm Optimization [20][21], Genetic Algorithm [22] dan sebagainya. Beberapa riset telah dilakukan untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang optimum pada sistem distribusi yang terhubung DG [23][24].

Dekade belakangan ini, metode Evolutionary Programming (EP) menjadi alat yang cukup ampuh dalam menyelesaikan masalah optimasi. Algoritma Genetik (GA) selalu disebut sebagai metode evolutionary programming yang paling sukses. Evolutionary programming sudah semakin populer dalam memecahkan masalah optimasi dalam sistem tenaga [25]. Untuk menunjang disertasi ini, penulis telah melakukan suatu simulasi untuk pembagian pembebanan pembangkit pada sistem distribusi yang terdiri dari beberapa pembangkit konvensional dan DG yang ditulis dalam paper reference [26]. Masing-masing unit pembangkit mempunyai fungsi biaya pembangkitan yang berbeda. Simulasi pada paper ini dilakukan dengan menentukan kapasitas dan

lokasi DG yang optimum sehingga bisa memenuhi seluruh kebutuhan beban dengan biaya pembangkitan yang paling rendah.

Kebutuhan akan energi listrik pada umumnya ditopang oleh suatu sistem yang terdiri dari beberapa pembangkit yang terinterkoneksi. Total daya yang dibangkitkan harus dapat memenuhi seluruh kebutuhan daya beban. Beban listrik selalu berubah setiap saat. Pada jam-jam tertentu beban berada pada level yang cukup tinggi, biasanya disebut sebagai beban puncak. Namun pada saat yang lain beban berada pada level yang rendah. Untuk dapat memenuhi kebutuhan daya beban selama perioda tertentu, perlu dilakukan penjadwalan unit pembangkit. Penjadwalan pembangkit ini tujuannya untuk menentukan pembangkit yang *on* atau *off* pada beban tertentu. Untuk mengimbangi perubahan daya beban, pembebanan yang optimal perlu dilakukan pada pembangkit yang *on*, sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang optimal dalam perioda tertentu. Setiap unit pembangkit mempunyai karakteristik dan batasan-batasan yang tidak bisa diabaikan. Penjadwalan pembangkit listrik harian sampai mingguan untuk mencapai tujuan optimasi dengan tetap memperhatikan batasan-batasan dari setiap unit pembangkit dikenal dengan istilah *unit commitment (UC)*.

Unit commitment secara umum didefinisikan sebagai penjadwalan pembangkit listrik dalam perioda tertentu (pada umumnya 24 jam) untuk mencapai tujuan biaya pembangkitan yang termurah. UC adalah salah satu masalah yang paling menantang dalam optimasi sistem tenaga. Untuk menyelesaikan optimasi ini pada umumnya menggunakan banyak variabel kontinu dan diskrit dari satu sampai beberapa fungsi objektif dan kendala batasan kuadrat linear dan kuadrat banyak. Dengan berbagai karakteristik unit akan menambah kompleksitas dan tantangan memecahkan UC. Penelitian tentang penjadwalan pembangkit yang optimum telah banyak dilakukan. Pada umumnya penjadwalan pembangkit dilakukan pada pembangkit besar yang terinterkoneksi pada saluran transmisi [27-40].

Penjadwalan untuk sistem tegangan menengah dengan DG yang terhubung pada saluran distribusi dan DG yang terintegrasi dalam microgrid juga telah dilakukan [42-46]. Pada umumnya penjadwalan pembangkit dilakukan pada sistem yang seimbang, sehingga perhitungan dan analisisnya dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan dan analisa untuk sistem satu fasa.

Penyelesaian unit commitment pada sistem distribusi dengan pembangkit konvensional dan pembangkit tersebar (DG) yang terhubung pada grid distribusi sangat berbeda dari UC pembangkit termal yang ada di jaringan listrik yang besar (macrogrid). Pembangkit yang tersebar pada sistem distribusi pada umumnya mempunyai kapasitas kecil dan dapat berupa pembangkit tenaga termal dan sumber-sumber energi terbarukan (*renewable energy*) seperti turbin angin (Wind Turbine/WT), biomass, panel surya (photovoltaic/PV), fuel cell, *combustion turbin* dan lain sebagainya. Keluaran daya dari pembangkit yang tersebar ini ada yang dapat diatur seperti turbin mikro, turbin pembakaran (*combustion turbine*) dan ada yang tidak dapat diatur seperti panel surya dan turbin angin. Daya keluaran dari panel surya tergantung dari besarnya intensitas cahaya matahari, sedangkan daya keluaran turbin angin tergantung dari kecepatan angin.

Dalam memanfaatkan daya dari pembangkit terbarukan yang mana dayanya tidak dapat diatur, maka diperlukan pemasangan baterai sebagai penyimpan energi. Baterai sebagai penyimpan energi diperlukan untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya jika terjadi pemutusan jaringan distribusi dengan jaringan utama atau sebagai penyimpan energi dari pembangkit terbarukan pada saat beban rendah. Karakteristik dari generator terbarukan dan perangkat penyimpanan energi sangat berbeda dengan pembangkit termal konvensional. Disamping itu output maksimum sumber energi terbarukan yang tidak dapat diatur dan biasanya tidak akan mengikuti trend normal permintaan beban, sehingga semakin membuat solusi UC semakin kompleks. Selain permasalahan didalam sistem distribusi itu sendiri, operasi dan kinerja jaringan utama juga akan mempengaruhi keputusan UC dalam sistem distribusi .

Untuk solusi penjadwalan pembangkit yang optimal pada sistem yang seimbang, para peneliti terdahulu telah menggunakan beberapa metoda antara lain metoda genetic algorithm (GA) [35][36], metoda hybrid particle swarm optimization (PSO) [37] dan metoda quantum inspired evolutionary [39][40].

Pada penelitian ini, dilakukan penjadwalan dan pembebanan pembangkit termal dan DG yang terhubung pada sistem distribusi radial yang tidak seimbang (*unbalance radial distribution system*) dengan memperhatikan rugi-rugi daya pada saluran distribusi. Metoda yang digunakan untuk menyelesaikan

permasalahan penjadwalan ini adalah *Quantum Evolutionary Algorithm* (QEA). QEA adalah algoritma evolusioner (EA) yaitu menggabungkan komputasi evolusioner dan komputasi kuantum yang berdasarkan pencarian stokastik dan metode optimasi yang didasarkan pada prinsip-prinsip evolusi biologis alami. EA beroperasi pada populasi solusi potensial, menerapkan prinsip *survival of the fittest* untuk menghasilkan solusi perkiraan berturut-turut yang lebih baik. Pada setiap generasi EA, satu set perkiraan baru yang dibuat pada proses pemilihan individu sesuai dengan tingkat fitnessnya dalam domain masalah dan mereproduksi individu tersebut menggunakan operator *quantum gate*. Metoda QEA dipilih karena telah terbukti cocok untuk penyelesaian masalah optimasi dengan berbagai variasi, ketidak pastian dan untuk optimasi linier. Dasar dari metoda QEA yang yang digunakan dalam riset ini dikembangkan oleh Kim & Han [48-50] dan telah digunakan dalam perhitungan optimasi pembangkit [39][40].

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana memodelkan sistim distribusi radial IEEE 15 bus dalam perangkat lunak Matlab.
- b. Bagaimana melakukan perhitungan aliran daya menggunakan metode Newton Raphson dengan menggunakan komponen urutan (sequence component).
- c. Bagaimana melakukan penjadwalan dan pembebanan optimum pada pembangkit termal, DG dan baterai sehingga mampu memenuhi kebutuhan beban dengan biaya pembangkitan paling rendah selama waktu 24 jam.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah yang telah dijelaskan maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memodelkan sistim distribusi radial tidak seimbang IEEE 15 bus yang dimodifikasi dengan distributed generation dalam perangkat lunak Matlab untuk melakukan simulasi perhitungan aliran daya.

2. Melakukan penjadwalan pada *distributed generation* yang terhubung pada saluran distribusi radial tidak seimbang dengan perubahan beban selama 24 jam.
3. Melakukan perhitungan optimasi biaya pembangkitan untuk *distributed generation* yang *non renewable*.
4. Menggunakan algoritma unit commitment (UC) untuk penjadwalan dan pembebanan optimum unit pembangkit guna memenuhi seluruh kebutuhan beban dengan tetap memperhatikan batasan sistem dan batasan dari masing-masing unit pembangkit

Dengan melakukan perhitungan optimasi ini diharapkan akan memberikan manfaat antara lain:

1. Dengan memanfaatkan DG yang dipasang dekat dengan beban, maka rugi-rugi saluran dapat diminimalkan. Sehingga dapat mengurangi penyediaan energi listrik, ini akan berakibat pada efisiensi bahan bakar.
2. Dengan menempatkan DG pada lokasi yang tepat, keandalan dan kualitas daya sistem akan meningkat sehingga akan menguntungkan konsumen dalam kontinyuitas dan kualitas penyaluran daya.
3. Dengan algoritma UC yang dilakukan dalam penelitian ini, industri listrik yang memiliki aset pembangkit konvensional dan pembangkit energi terbarukan dapat menggunakan algoritma ini untuk menjadwalkan unit-unit pembangkitnya secara optimal.

1.4 Kontribusi Penelitian

Kontribusi dari penelitian ini adalah bagaimana melakukan penjadwalan dan pembebanan yang optimal pada pembangkit termal dan pembangkit yang tersebar (DG) seperti turbin mikro, turbin angin, panel surya dan baterai yang terhubung pada jaringan distribusi radial yang tidak seimbang dengan memperhatikan rugi-rugi saluran distribusi, dengan memperhatikan batasan-batasan dari pembangkit dan sistem, sehingga biaya pembangkitan minimal dapat dicapai.

Orisinalitas dari penelitian ini adalah penjadwalan dan pembebanan DG pada sistem distribusi yang tidak seimbang menggunakan metoda quantum evolutionary.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Ketidak seimbangan sistem $\leq 3\%$
- b. Jenis DG yang digunakan dalam simulasi ini adalah micro turbine (MT), photo voltaic (PV) dan wind turbine (WT) .
- c. Dalam perhitungan UC, DG ditempatkan pada bus yang sudah ditentukan.
- d. Bus dimana DG ditempatkan diasumsikan sebagai PV bus.
- e. Daya yang disuplai oleh PV adalah daya aktif (MW).
- f. Baterai diasumsikan *discharge* pada beban rendah dan *didischarge* pada beban yang tinggi.
- g. Penempatan dan penjadwalan DG *non renewable* dan baterai dilakukan pada jaringan distribusi radial IEEE 15 bus yang dimodifikasi pada beban yang tidak seimbang.

1.6 Riset yang Menunjang Disertasi

Adapun riset yang sudah dilakukan untuk menunjang disertasi ini (disertakan dalam lampiran) adalah :

1. Riset pertama adalah menentukan lokasi dan kapasitas DG menggunakan metode metode quantum genetika yang digabung dengan perhitungan aliran daya Newton Raphson untuk mendapatkan rugi-rugi jaringan yang terendah dan meningkatkan profile tegangan bus. Metode ini diterapkan pada sistem IEEE 14 bus. Lokasi DG hanya pada bus-bus yang tidak ada generatornya. Kapasitas DG dibatasi $1 \leq P_{DG} \leq 50 MW$. Hasil riset dengan metode ini dibandingkan dengan hasil riset dengan metode Beeder GA. Dari perbandingan ini menunjukkan bahwa metode yang diusulkan lebih baik dari metode breeder GA. Hasil riset ini sudah dipresentasikan pada TENCON tahun 2011.
2. Riset yang kedua adalah menentukan lokasi dan kapasitas DG pada sistim distribusi radial yang tidak seimbang untuk meminimalkan losses dan meningkatkan profile tegangan. Dengan metode quantum genetika DG ditempatkan pada bus-bus yang tidak terpasang pembangkit/ generator.

Metode ini diterapkan pada sistem IEEE 15 bus yang dimodifikasi sehingga beban pada fasanya tidak seimbang. Hasil simulasi ini menunjukkan rugi-rugi daya lebih rendah dan profile tegangan bus lebih baik dibandingkan hasil perhitungan pada sistem tanpa DG. Hasil riset ini sudah dipublikasikan pada jurnal International Riview of Electrical Engineering (IREE) pada tahun 2014.

3. Riset yang ke tiga adalah menentukan lokasi dan kapasitas DG pada beban maksimal, dengan tujuan untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang termurah dan meningkatkan tegangan bus yang berada di bawah standard. Metode yang digunakan pada riset yang ketiga ini adalah metode quantum genetika yang dikombinasikan dengan perhitungan aliran daya metoda Newton Raphson. Metode ini diterapkan pada sistem IEEE 14 bus. Untuk mendapatkan beban maksimum sistem, jumlah beban dinaikkan secara bertahap sampai tegangan pada salah satu atau beberapa bus berada dibawah standar yang ditetapkan ($0.9 \leq V \leq 1.1$ pu). Pada kondisi ini dipasang DG pada sistem. Lokasi dan kapsitas DG ditentukan berdasarkan biaya pembangkitan yang terendah dan tegangan pada bus-bus berada pada nilai standar. Hasil riset ini sudah dipublikasikan pada jurnal International Journal of Electrical and Computer Engineering (IREE) pada tahun 2017.

1.7 Roadmap Penelitian dan Penelitian Sebelumnya.

Roadmap atau peta jalan penelitian secara keseluruhan yang dilakukan oleh peneliti diberikan pada Gambar 1.1 dalam bentuk *fishbone diagram*. Untuk menghasilkan target “ *Penjadwalan dan Pembebanan Optimum Distributed Generation Pada Sistem Distribusi Radial Tidak Seimbang Menggunakan Metode Quantum Evolutionary* ”.

Dalam penelitian ini ada beberapa tahapan yang sudah dilakukan untuk menunjang target penelitian, antara lain: menempatkan dan menentukan kapasitas optimum DG dalam saluran distribusi untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran dan meningkatkan profile tegangan. Beberapa peneliti juga sudah melakukan penelitian untuk menempatkan dan menentukan kapasitas optimum DG, dengan metode yang berbeda. Tahapan yang berikutnya adalah menghitung biaya

pembangkitan yang optimum DG pada sistem distribusi. Tahapan yang terakhir adalah mensimulasikan penjadwalan dan pembebanan optimum (*unit commitment*) DG pada saluran distribusi.

Pada sistem yang besar (*macrogrid*), energi listrik didapat dari sumber energi termal dan sumber energi hidro. Solusi untuk UC pembangkit termal dan hidro sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya [27-41].

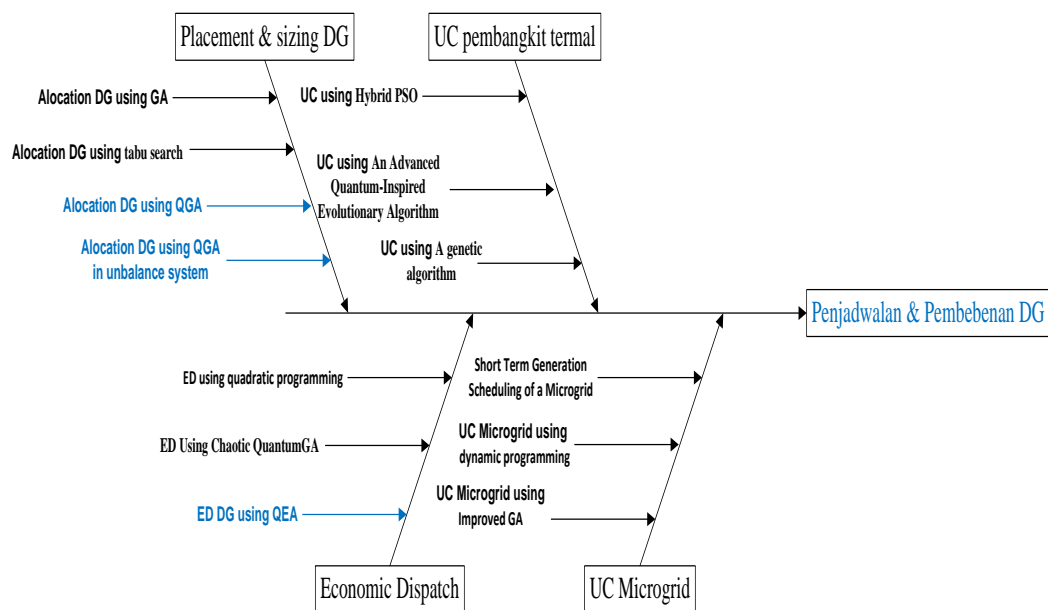
Dengan semakin banyaknya pemanfaatan DG sebagai sumber energi, perlu dilakukan penjadwalan dan pembebanan yang optimum (UC) dari seluruh pembangkit yang mensuplai daya beban. Masalah UC pada saluran distribusi dengan DG sangat berbeda dengan UC pada sistem yang besar. DG pada saluran distribusi biasanya terdiri beberapa sumber energi terbarukan dan baterai. Karakteristik pembangkit energi terbarukan dan baterai sangat berbeda dengan pembangkit konvensional, sehingga membuat penyelesaian UC lebih kompleks dibandingkan dengan penyelesaian masalah UC untuk pembangkit konvensional pada sistem yang besar.

Dalam beberapa dekade terakhir, telah ada solusi untuk masalah UC dalam sistem tenaga yang konvensional. Beberapa teknik yang sangat menjanjikan meliputi metoda berbasis heuristik dengan menggunakan Priority List (PL)[27], Dynamic Programming (DP) [28-30], Lagrangian Relaxation (LR) [31].

Saat ini teknik Evolutionary Algoritma (EA) telah menjadi alat yang ampuh dalam memecahkan masalah optimasi seperti UC, seperti genetic algoritma (GA) [35][36], simulated annealing (SA)[38], particle swarm optimization (PSO) [31] dan quantum genetic algoritma (QGA) [39][40].

Pada penelitian ini metoda *quantum evolutionary* digunakan untuk solusi penjadwalan dan pembebanan pembangkit yang tersebar (DG) yang terhubung pada jaringan distribusi yang tidak seimbang (*unbalance distribution system*). Metoda ini sudah digunakan peneliti untuk solusi menempatkan dan menentukan kapasitas DG dan solusi *economic dispatch* pada paper penunjang disertasi. Metoda ini dipilih, karena terbukti cukup handal untuk menyelesaikan permasalahan optimasi. Penelitian metode quantum evolutionary dilakukan oleh Han dan Kim, dengan menggabungkan perhitungan evolutionary dan perhitungan quantum. Penelitian menggabungkan komputasi evolusioner dan komputasi kuantum dimulai pada akhir tahun 1990an. Komputasi evolusioner kuantum

adalah cabang studi tentang perhitungan evolusioner dan menggunakan prinsip mekanika quantum, seperti superposisi, gangguan dan ketidakpastian [47-51].



Gambar 1.1 Road map penelitian dan penelitian sebelumnya

Tabel 1.1 Daftar Publikasi Peneliti

Hasil riset yang telah dilakukan dan dipublikasikan oleh peneliti	
1	Ni Ketut Aryani, Muhammad Abdillah, I Made Yulistya Negara, Adi Soeprijanto, Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation using Quantum Genetic Algorithm for Reducing Losses and Improving Voltage Profile , TENCON 2011.
2	Ni Ketut Aryani, Mat Syai'in, Adi soeprijanto, I Made Yulistya Negara, Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation for Minimize Losses in Unbalance Radial Distribution Systems using Quantum Genetic Algorithm , (International Review of Electrical Engineering /I.R.E.E Vol. 9 N.1 January – February 2014).

Tabel 1.1 Daftar Publikasi Peneliti (Lanjutan)

Hasil riset yang telah dilakukan dan dipublikasikan oleh peneliti	
3	Ni Ketut Aryani, Adi Soeprijanto , I Made Yulistya Negara, Mat Syai'in, Economic Dispatch using Quantum Evolutionary Algorithm in Electrical Power System involving Distributed Generators , Vol. 7, No. 5, October 2017, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)
4	Ni Ketut Aryani, Ontoseno Penangasang, Suyanto, Suwito, Adi Soeprijanto, Dimas Fajar Uman Putra, Aden Riangga, Sabila Bagus Panuntun, Muhammad Ali Fikri, Indrawan Gunartono, Aji Istanto Rambono, Ranik Chairunnisa Akbar, Adinda Soraya Ayu Wardhany & Azka Quamila Yusrina, Solar PV Model for Eco Garden and Hydroponic Daily Watering Systems , International Conference on Sustainability, Green Building, Environmental Engineering & Renewable Energy (SGER 2016).

Tabel 1.2 Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai *placement* dan *sizing* DG

Hasil riset yang telah dipublikasikan oleh peneliti <i>Placement & Sizing DG</i>	
1	Carmen L.T.Borges, Djalma M.Falcao, Optimal distributed generation for reliability, losses and voltage improvement . ELSEVIER Electrical Power and Energy System 28(1006) 4130-420, February 2006.
2	Sudipta Ghosh, S.P. Ghoshal, Saradindu Ghosh, Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system , ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems 32 (2010) 849–85
3	M.Sedighizadeh, A.Rezazadeh, Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile . World Academy of Science, Engineering and Technology 37 2008.
4	Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, Ashizawa T. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators . IEEE PES Winter Meet 2001

Tabel 1.3 Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai *Economic Dispatch*

Hasil riset yang telah dipublikasikan oleh peneliti <i>Economic Dispatch</i>	
1	John G. Vlachogiannis and Kwang Y. Lee, Economic Load Dispatch A Comparative Study on Heuristic Optimization Techniques With an Improved Coordinated Aggregation-Based PSO , IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, May 2009 .
2	Gwo-Ching Liao, Using Chaotic Quantum Genetic Algorithm Solving Environmental Economic Dispatch of Smart Microgrid Containing Distributed Generation System Problems , 2010 International Conference on Power System Technology.
3	Gwo-Ching Liao, The optimal economic dispatch of smart Microgrid including Distributed Generation , 2013 International Symposium on Next-Generation Electronics IEEE Conferences.
4	Rony Seto Wibowo; Kemas Robby Firmansyah; Ni Ketut Aryani; Adi Soeprijanto , Dynamic economic dispatch of hybrid microgrid with energy storage using quadratic programming , 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)

Tabel 1.4 Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai *Unit Commitment*

Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai <i>Unit Commitment</i>	
1	C. Y. Chung, Han Yu, and Kit Po Wong, An Advanced Quantum Inspired Evolutionary Algorithm for Unit Commitment , IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26, NO. 2, MAY 2011.
2	T. W. Lau, C. Y. Chung, K. P. Wong, T. S. Chung, and S. L. Ho, Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm Approach for Unit Commitment , IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 24, NO. 3, AUGUST 2009
3	S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, and V. Petridis, A genetic algorithm solution to the unit commitment problem , <i>IEEE Trans. Power Syst.</i> , vol. 11, no. 1, pp. 83–92, Feb. 1996

Tabel 1.4 Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai *Unit Commitment* (Lanjutan)

Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai <i>Unit Commitment</i>	
3	P. C. Yang, H. T. Yang, and C.-L. Huang, Solving the unit commitment problem with a genetic algorithm through a constraint satisfaction technique , <i>Elect. Power Syst. Res.</i> , vol. 37, pp. 55–65, 1996.
4	T. O. Ting, M. V. C. Rao, and C. K. Loo, A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization , <i>IEEE Trans. Power Syst.</i> , vol. 21, no. 1, pp. 411–418, Feb. 2006.

Tabel 1.5 Daftar Publikasi Peneliti lain mengenai *Unit Commitment* pada *Microgrid*

Publikasi Peneliti lain mengenai <i>Unit Commitment</i> pada <i>Microgrid</i>	
1	H.Z. Liang, H.B. Gooi, Unit Commitment in Microgrids by Improved Genetic Algorithm , IEEE IPEC, 2010 Conference Proceedings.
2	Xiong Wu, Xiuli Wang and Zhaohong Bie, Optimal Generation Scheduling of a Microgrid , 2012 3 rd IEEE PES Inovative Smart Grid Thecnologies Europe(ISGT Europe) Berlin
3	T. Logenthiran, Dipti Srinivasan, Short Term Generation Scheduling of a Microgrid , IEEE TENCON Region 10, 2009.
4	H. Kanchev; B. Francois; V. Lazarov, Unit commitment by dynamic programming for microgrid operational planning optimization and emission reduction , International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference, 2011 IEEE Conference.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Telaah Pustaka

Energi listrik yang dipakai tentunya harus bersifat efisien, kualitas dayanya baik dan andal. Berarti dalam pembangkitan dan penyaluran energi itu harus dilakukan secara ekonomis dan rasional. Usaha untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi listrik telah banyak dilakukan. Ada beberapa cara untuk meningkatkan efisiensi biaya pembangkitan dengan melakukan penjadwalan unit pembangkit dan mengatur pembebanan optimum pada unit pembangkit beroperasi. Seperti telah disebutkan pada bab sebelumnya bahwa penjadwalan pembangkit yang optimum dapat didekati dengan metoda analytic dan metoda heuristic .

Penjadwalan dan pembebanan pembangkit dikenal dengan istilah *Unit Commitment* (UC). UC adalah proses optimasi untuk menentukan status running dan menentukan daya output yang optimal dari beberapa unit pembangkit untuk memenuhi kebutuhan total beban dalam batas-batas sistem distribusi dan batas dari masing-masing unit pembangkit. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa setiap unit pembangkit memiliki karakteristik teknis *minimum up / down time*, batas *ramp*, batas daya maksimum dan minimum. Semua ini harus dipertimbangkan untuk menghitung biaya pembangkitan minimum untuk periode operasi multi jam.

Pada awalnya, penjadwalan pembangkit dilakukan untuk pembangkit besar seperti pembangkit termal yang terhubung pada saluran transmisi [15-19]. Namun saat ini, dimana banyak memanfaatkan pembangkit yang terbarukan maka penjadwalan untuk DG yang terhubung pada saluran distribusi dan DG yang terintegrasi dalam microgrid juga telah dilakukan [25-27]. Penjadwalan pembangkit pada tegangan rendah atau microgrid dilakukan pada sistem yang seimbang, sehingga perhitungannya bisa dilakukan dengan menggunakan simulasi untuk sistem satu fasa.

Masalah UC adalah masalah yang bersifat kombinatorial dan terdiri dari banyak kendala. Untuk memecahkan masalah ini, pertama kali dilakukan penjadwalan pembangkit. Pada tahap ini ditentukan pembangkit yang *on* atau *off*. Kemudian biaya pembangkitan dievaluasi melalui perhitungan *economic dispatch* untuk pembangkit yang beroperasi.

Dalam literatur, berbagai pendekatan optimasi numerik telah diterapkan untuk menangani masalah UC. Teknik deterministik yang digunakan sebelumnya adalah daftar prioritas (priority list) [28], pemrograman dinamis (dynamic programming) [29-31], relaksasi Lagrangian [32], [33], pemrograman mixed-integer [34], dan metode branch-and-bound [35]. Perhitungan UC dengan pendekatan priority list sangat sederhana dan cepat, namun biasanya menghasilkan biaya produksi yang tinggi. Pemrograman dinamis bersifat fleksibel namun kesulitannya pada masalah dimensi tinggi. Metode branch-and-bound menggunakan fungsi linier untuk mewakili konsumsi bahan bakar dan biaya start-up yang bergantung pada waktu dan memperoleh batas bawah dan atas yang dibutuhkan. Namun, waktu komputasinya meningkat secara eksponensial dengan selisih dimensi masalah UC. Metode pemrograman mixed-integer menggunakan teknik pemrograman linier untuk memecahkan dan memeriksa solusi bilangan bulat. Namun itu juga sulit karena membutuhkan waktu komputasi yang lama. Sementara metode relaksasi Lagrangian menawarkan solusi yang lebih cepat, tetapi ada kemungkinan mengalami masalah pada konvergensi numerik.

Penelitian menggabungkan komputasi evolusioner dan komputasi kuantum dimulai pada akhir tahun 1990an. Komputasi evolusioner kuantum adalah cabang studi tentang perhitungan evolusioner dan menggunakan prinsip mekanika kuantum tertentu, seperti superposisi, gangguan dan ketidakpastian [18-21]. Berdasarkan konsep dan prinsip komputasi kuantum, seperti bit kuantum (Q-bit), gerbang kuantum (Q_gates/ rotation gate) dan superposisi state, Han dan Kim [30] mengembangkan algoritma *quantum inspired evolutioner* (QEA), yang dapat mencapai keseimbangan yang lebih baik antara eksplorasi dan eksploitasi dari ruang solusi dan juga mendapatkan solusi yang lebih baik, bahkan dengan populasi kecil dibandingkan dengan konvensi emisi. Kinerja superior QEA untuk masalah optimasi kombinatorial ditunjukkan pada [29][30].

Dalam penelitian ini penjadwalan pembangkit pada jaringan distribusi dilakukan untuk pembangkit thermal (grid utama), DG dan baterai yang terhubung dengan grid pada sistem distribusi radial yang tidak seimbang (*unbalance radial distribution system*). Adapun permasalahan pada jaringan distribusi adalah ketidak seimbangan beban. Ketidak seimbangan pada jaringan distribusi ini terjadi karena beban satu fasa pada sisi pelanggan jaringan tegangan rendah yang selalu berubah.

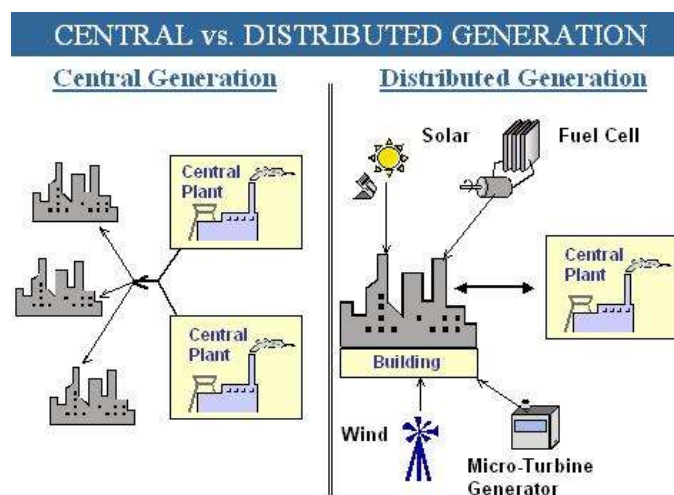
Dengan algoritma UC yang dilakukan dalam penelitian ini, diharapkan industri tenaga listrik yang memiliki aset pembangkit konvensional dan pembangkit terbarukan dapat menggunakan algoritma ini untuk menjadwalkan unit-unit pembangkitnya secara optimal.

2.2 Distributed Generation (DG).

Dalam sistem kelistrikan konvensional, daya listrik dibangkitkan oleh pembangkit skala besar yang terpusat dan terletak jauh dari beban. Pembangkit-pembangkit tersebut pada umumnya memanfaatkan energi konvensional seperti bahan bakar minyak, gas, dan tenaga air. Namun dalam beberapa tahun terakhir konsep sistem kelistrikan konvensional tersebut mulai digantikan oleh konsep Distributed Generation (DG) [1].

Apa sebenarnya DG itu?

Gambar 2.1 adalah ilustrasi untuk membedakan *distributed generation* dan *centralized generation*.



Gambar 2.1 Pembangkit tersebar (DG) dan Pembangkit Terpusat [52].

Beberapa peneliti telah mencoba memberikan definisi tentang DG, sehingga mereka mempunyai pemahaman yang sama[1]. Namun hal ini tidaklah mudah karena:

1. Secara umum, DG tidak bergantung pada besarnya daya dan tegangan
2. Dari segi teknologi DG dapat dikategorikan sebagai *renewable* dan *non-renewable*.
3. Lokasi geografis bukanlah parameter yang sesuai untuk membedakan DG dari pembangkit yang terpusat.
4. DG dapat berdiri sendiri atau terhubung dengan *grid*.
5. DG dihubungkan ke grid baik secara langsung atau dengan menggunakan transformator atau perangkat elektronika daya. Dalam hal ini, sistem proteksi dan juga alat pengukuran dan metering juga termasuk ke dalamnya.
6. DG dengan kapasitas kecil pada umumnya dihubungkan ke jaringan distribusi. Akan tetapi DG kapasitas lebih besar dari 110 MW dapat dihubungkan ke jaringan transmisi.
7. Keuntungan dari DG dapat dilihat dalam hal kualitas daya, proteksi lingkungan, pengurangan investasi dan rugi-rugi transmisi dan distribusi, penggunaan sumber bahan bakar domestik yang beragam, *back-up*, aplikasi CHP, suplai energi ke daerah terpencil, dan peningkatan lapangan kerja.

Dengan melihat DG seperti yang disebutkan diatas , maka ada beberapa definisi mengenai DG, antara lain:

Menurut DPCA (*Distributed Power Coalition of America*)

Distributed power generation adalah teknologi pembangkitan energi listrik berskala kecil yang menghasilkan daya listrik di suatu tempat yang lebih dekat dengan pusat beban/ konsumen dibandingkan dengan pembangkit listrik terpusat.

Menurut IEA (*International Energy Agency*)

Distributed Generation adalah pembangkit listrik yang melayani konsumen di tempat (*on-site*), atau untuk mendukung jaringan distribusi dan terhubung ke

jaringan pada level tegangan distribusi. Teknologinya secara umum terdiri dari mesin, turbin kecil (termasuk turbin mikro, fuel cell dan photovoltaic).

Menurut standar IEEE 1547[2].

DG adalah pembangkit listrik yang terhubung langsung di sisi pelanggan dengan kapasitas maksimal 10 MVA [2].

Sementara *International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE)* mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan ciri-ciri berikut ini [9]:

1. Tidak terpasang terpusat
2. Memiliki ukuran yang tetap
3. Umumnya terpasang pada sistem distribusi
4. Berkapasitas tidak lebih dari 50-100 KW .

Dari beberapa definisi tentang DG , maka definisi DG dapat rangkum sebagai berikut:

1. Sumber pembangkit energi modular dan terstandarisasi menggunakan sumber energi terbarukan dengan rentang daya sampai beberapa MW .
2. *Cogeneration* yang terhubung ke jaringan distribusi .
3. Sumber energi kurang dari 10 MW, yang tidak direncanakan secara terpusat (*not centrally planned*) dan terhubung ke jaringan distribusi .
4. Sumber energi kurang dari 50 MW untuk konsumsi lokal dan dijual ke *utility*.
5. Sumber energi kurang dari 20 MW, yang tidak direncanakan secara terpusat dan terhubung ke jaringan distribusi.
6. Pembangkit listrik yang dimiliki oleh pihak ketiga yang terhubung ke jaringan.
7. Sumber yang tidak terhubung ke sistem transmisi .

Dari penjelasan di atas, maka kita dapat melihat bahwa banyak definisi yang sudah ada dan tidak ada konsistensi/ keseragaman diantara definisi-definisi tersebut. Karena banyaknya variasi definisi yang digunakan di berbagai literatur tersebut, ada beberapa isu yang harus didiskusikan untuk dapat mendefinisikan DG secara lebih akurat, yaitu [2]:

1. Tujuan
2. Lokasi
3. Rating DG
4. Daerah pengiriman daya
5. Teknologi
6. Pengaruh terhadap lingkungan
7. Mode operasi
8. Kepemilikan
9. Penetrasi DG

Dengan meningkatnya tren penggunaan DG, maka sistem distribusi pasif telah perlahan digantikan oleh sistem distribusi aktif. Sistem distribusi aktif adalah sistem distribusi yang memungkinkan adanya aliran daya tidak hanya dari pembangkit terpusat saja, namun juga aliran daya dari arah sebaliknya yaitu dari DG yang dipasang pada sisi beban. Hal ini menyebabkan beberapa keuntungan terkait perbaikan kualitas daya pada sistem distribusi seperti pengurangan rugi-rugi daya, perbaikan profil tegangan dan peningkatan keandalan sistem [3].

Menurut istilahnya, DG juga dapat disebut dengan beberapa istilah lain seperti *Embedded Generation*, *Dispersed Generation*, dan *Decentralized Generation* yang semuanya mengarah pada pengertian yang cenderung sama yaitu pembangkit skala kecil yang tersebar.

Definisi DG tidak mendefinisikan rating sumber pembangkitan, karena rating maksimum bergantung pada kondisi jaringan distribusi lokal, seperti level tegangan. Akan tetapi perbedaan kategori tersebut sangat berguna, sehingga Ackermann et al memberikan saran pembagian rating tersebut sebagai berikut:

Tabel 2.1 Rating DG [1]

Kategori	Kapasitas
Micro distributed generation	~1 W - 5 kW
Small distributed generation	5 kW - 5 MW
Medium distributed generation	5 MW - 50 MW
Large distributed generatio	50 MW - 300 MW

Secara sederhana, tujuan utama pemasangan DG pada sistem distribusi adalah [2]:

1. Membangkitkan daya kontinyu untuk beban.
2. Menyediakan daya untuk beban yang tidak terjangkau grid.
3. Menyediakan daya untuk mengantisipasi pertumbuhan beban ditengah keterbatasan perkembangan pembangkit dan jaringan transmisi.
4. Memaksimalkan penggunaan energi terbarukan.
5. Meningkatkan efisiensi energi dengan mengurangi rugi-rugi daya.
6. Mengurangi polusi dan efek rumah kaca.
7. Menyediakan listrik dengan kualitas daya yang baik untuk beban sensitif.

DG secara umum dihubungkan langsung ke sistem distribusi sedangkan DG dengan kapasitas yang besar (contoh. wind turbine) dapat dihubungkan pada sistem transmisi.

Pemasangan DG pada sistem distribusi dan dekat dengan beban membawa dampak yang signifikan dalam perbaikan kualitas daya.

Beberapa keuntungan lain dari pemasangan DG pada sistem distribusi yaitu [2]:

1. Dilihat dari sisi pelanggan listrik, pelanggan listrik diuntungkan karena mempunyai pembangkit cadangan yang dapat meningkatkan keandalan sistem. Selain itu adanya transaksi energi yaitu pembelian daya yang dibangkitkan DG oleh grid juga dapat memberikan kompensasi sehingga menguntungkan secara ekonomi.
2. Dari sudut pandang pengelola dan penyedia listrik, pemasangan DG dapat menambah kapasitas jaringan transmisi dan distribusi karena daya tidak hanya terbangkitkan oleh pembangkit pusat namun langsung dibangkitkan oleh DG pada sisi beban. Selain itu pemasangan DG juga dapat melindungi jaringan dari pertumbuhan beban yang tidak pasti.
3. Dari sudut pandang pembangkit, produsen energi komersial dapat membeli dan menyediakan daya listrik dari DG tanpa harus membangun pembangkit baru dengan biaya investasi yang mahal.
4. Dari sudut pandang teknis, pemasangan DG pada lokasi dan kapasitas yang tepat dapat mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, dan meningkatkan keandalan sistem.

5. Dari sudut pandang ekonomi, pemasangan DG dapat menghemat biaya karena teknologi DG seperti panel surya dan turbin angin memiliki biaya pembangunan, operasi, dan perawatan yang murah.
6. Dari sudut pandang lingkungan, pemasangan DG sesuai dengan tren penggunaan energi terbarukan dan efisien karena DG membangkitkan daya dari energi terbarukan yang tidak menghasilkan emisi atau polusi seperti pembangkit konvensional skala besar.

Lebih lanjut, definisi DG tidak mendefinisikan tentang area pengiriman daya, penetrasi, kepemilikan maupun perlakuan di dalam operasi jaringan. Definisi mengenai DG juga tidak mendefinisikan teknologi, karena teknologi dapat digunakan secara luas dalam aplikasinya. Akan tetapi, kategorisasi kelompok teknologi yang berbeda mungkin dapat dilakukan, sehingga, Ackermann et al membaginya ke dalam kategori berikut (walaupun yang lain juga dapat digunakan):

1. Renewable DG
2. Modular DG
3. CHP (*Combined Heat and Power*) DG

2.2.1 Teknologi DG [1]

Beberapa teknologi DG bukanlah merupakan teknologi yang baru (misalnya *internal combustion engine*, turbin gas dll). Disisi lain, karena perubahan industri *utility*, beberapa teknologi baru semakin dikembangkan lebih lanjut menuju tahap komersialisasi.

Tabel 2.2 mengenai teknologi DG yang digunakan di negara Amerika Serikat, yang dapat dijadikan referensi mengingat banyaknya jenis teknologi yang dipakai untuk aplikasi DG.

2.2.2 Panel surya (*Photovoltaic/PV*)

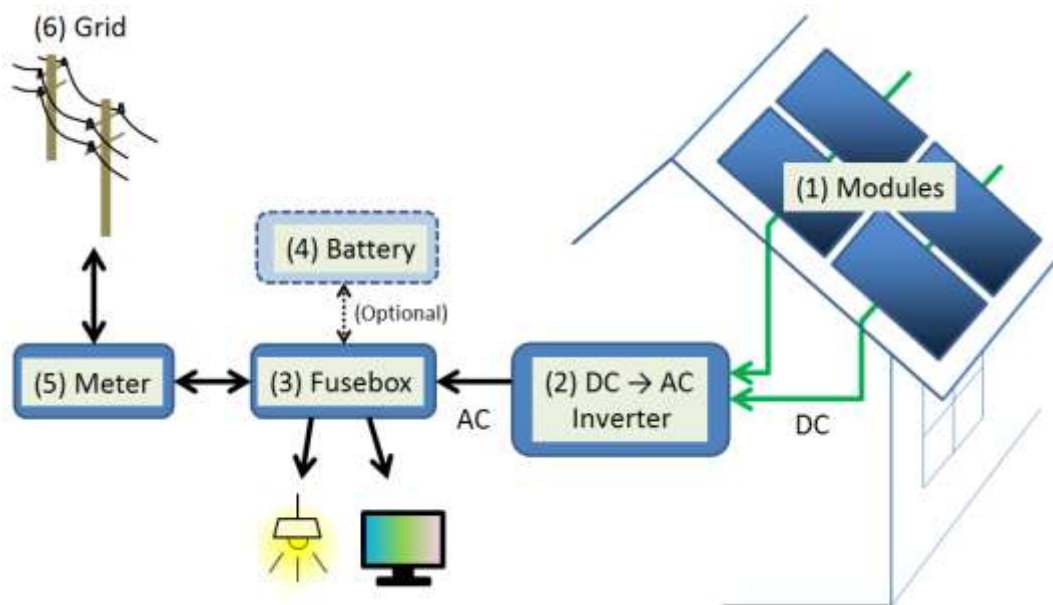
Panel surya (*Photovoltaic*) terbuat dari kristal silikon yang dirancang untuk menangkap foton dari cahaya dan mengkonversikannya menjadi energi listrik. Sel-sel tersebut dihubungkan satu sama lain untuk membentuk panel surya dengan bentuk dan ukuran yang beragam, dan secara umum, semakin besar ukuran panel,

daya yang dibangkitkan juga semakin besar. Daya output dapat bernilai dari beberapa watt sampai megawatt, yang hampir selalu hanya bergantung pada ukuran panel PV nya

Kelebihan utama dari sistem PV yaitu memanfaatkan intensitas cahaya matahari untuk membangkitkan energi listrik, yang mana cahaya matahari dapat diperoleh secara gratis sehingga PV dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Karena tidak menggunakan bahan bakar fosil untuk membangkitkan daya, sel PV dapat dikatakan bebas emisi. Akan tetapi, karena cahaya matahari hanya bersinar disiang hari, mekanisme *storage* sangatlah dibutuhkan. Selain itu kekurangan dari PV adalah biaya instalasi awal PV relatif lebih tinggi bila dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis lain.

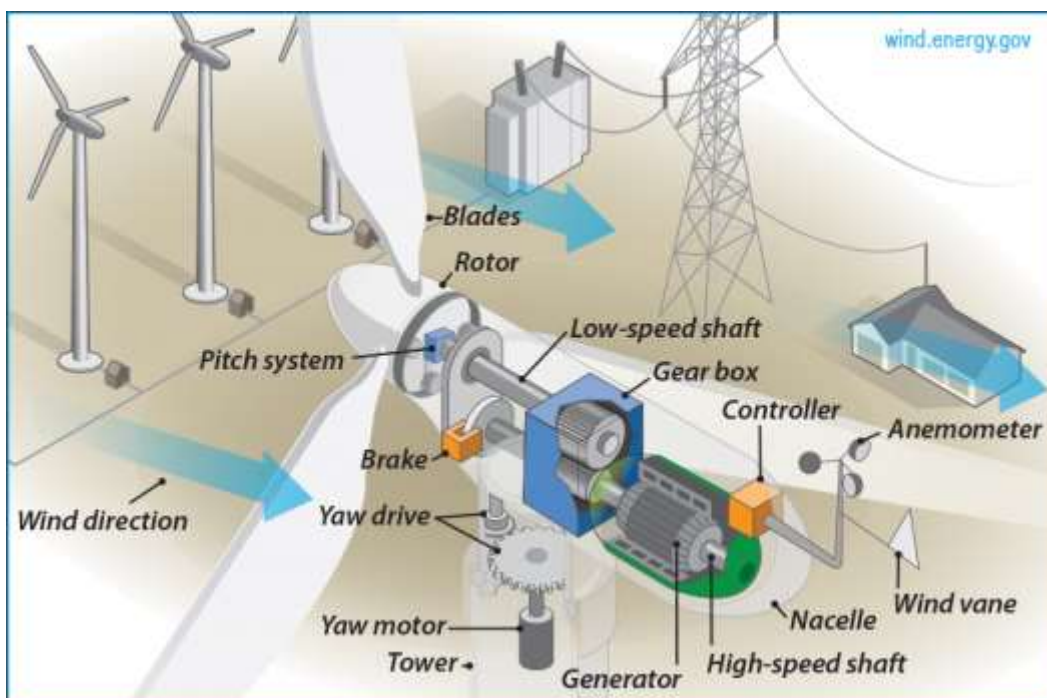
Tabel 2.2 Kalisifikasi DG berdasar Teknologi Pembangkitan[1].

Teknologi DG	Kapasitas per Modul
Combined cycle gas T.	35–400 MW
Internal combustion engines	5 kW–10 MW
Combustion turbine	1–250 MW
Micro-Turbines	35 kW–1 MW
Small hydro	1–100 MW
Micro hydro	25 kW–1 MW
Wind turbine	200 Watt–3 MW
Photovoltaic arrays	20 Watt–100 kW
Solar thermal, central receiver	1–10 MW
Solar thermal, Lutz system	10–80 MW
Biomass, e.g. based on gasification	100 kW–20 MW
Fuel cells, phosacid	200 kW–2 MW
Fuel cells, molten carbonate	250 kW–2 MW
Geothermal	5–100 MW
Ocean energy	100 kW–1 MW
Stirling engine	2–10 kW
Battery storage	500 kW–5 MW



Gambar 2.2 Panel Surya (Photovoltaic/PV) [53].

2.2.3 Turbin Angin (Wind Turbine/WT)

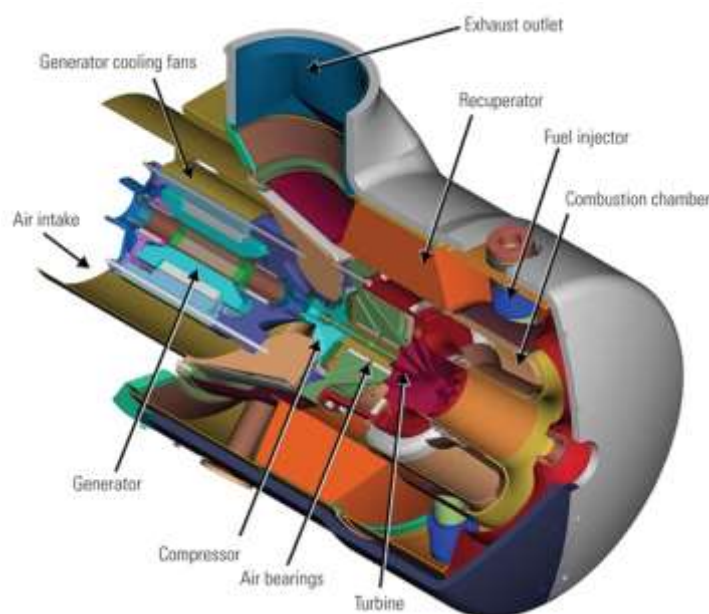


Gambar 2.3 Pembangkit tenaga angin (wind turbine/WT) [54].

Turbin angin adalah alat yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik. Turbin angin diproduksi dalam berbagai jenis sumbu vertikal dan horizontal. Turbin yang kecil digunakan untuk aplikasi seperti pengisian baterai untuk daya tambahan untuk kapal dan sebagainya. Turbin yang lebih besar dapat digunakan untuk memberikan kontribusi pada pasokan listrik domestik atau menjual listrik yang tidak terpakai ke industri pembangkit listrik melalui jaringan listrik. Array turbin besar, yang dikenal sebagai pembangkit tenaga angin, menjadi sumber energi terbarukan intermiten yang semakin penting dan digunakan oleh banyak negara sebagai bagian dari strategi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

2.2.4 Turbin Mikro (Micro Turbine/MT).

Turbin mikro adalah turbin pembakaran kecil yang menghasilkan beberapa kW sampai beberapa MW. MT biasanya didukung oleh gas alam, namun juga dapat didukung oleh biogas, hidrogen, propane atau diesel. Dalam ukuran kecil, teknologi ini menunjukkan fleksibilitas operasional yang tinggi, dengan waktu start up sekitar 3 menit dan waktu shut-down sekitar 10 menit. Operasinya dibatasi oleh *ramp up* dan *down rates*, *startup* dan *stop time*, minimum dan maksimum keluaran daya. Total biaya operasi turbin mikro terdiri dari biaya bahan bakar, biaya emisi, biaya perawatan dan biaya startup.



Gambar 2.4 Turbin Mikro (Micro Turbine/MT) [55].

Adapun kelebihan dan kekurangan dalam pemanfaatan MT sebagai sumber energi listrik antara lain:

Kelebihannya:

- Sejumlah kecil bagian yang bergerak.
- Ukuran kecil
- Ringan.
- Efisiensi yang baik dalam kogenerasi.
- Rendah emisi.
- Bisa memanfaatkan bahan bakar bekas.
- Interval perawatan yang panjang.

Kekurangannya:

- Bahan bakar rendah untuk efisiensi listrik.
- Kehilangan daya output dan efisiensi daya dengan suhu dan elevasi lingkungan yang lebih tinggi.

2.2.5 Manfaat DG

Berdasar pemanfaatannya sebagai sumber energi listrik, DG dapat difungsikan sebagai :

1. Pembangkit daya cadangan (*emergency backup*)

Pemanfaatan utama *on-site generator* adalah untuk menyediakan pembangkit daya cadangan ketika terjadi power outage/ terlepasnya pembangkit dari jaringan. Ada banyak tempat, seperti rumah sakit, telekomunikasi, pusat data, yang mana terjadinya power outage sangat tidak diinginkan. Jenis pelayanan ini dan juga industri, bersedia untuk membayar dengan harga yang tinggi untuk menjaga agar suplai daya tetap konstan. Secara tradisional, *diesel internal combustion engine* telah digunakan bersama dengan baterai sebagai *backup power*, jika terjadi gangguan peralatan tersebut akan berfungsi. *Uninterruptible Power Supply* (UPS) juga telah digunakan sebagai *backup power*. Akan tetapi, karena secara umum UPS ini merupakan peralatan yang berbasis baterai, maka alat ini hanya dapat bekerja untuk waktu yang terbatas dan tidak optimal digunakan ketika terjadi power outage yang

lama. Dengan meningkatnya perhatian akan lingkungan, generator diesel tidak banyak lagi digunakan karena jumlah emisi CO₂ dan NO_x-nya yang banyak. *Hydrogen fuel cell* telah mulai dijual secara komersial sebagai penyedia *backup power*. *Fuel cell* menghasilkan emisi yang rendah sehingga membuatnya lebih bersih daripada generator diesel. *Fuel cell* juga lebih murah bila dibandingkan dengan *battery backup* dengan kapasitas yang sama.

2. Memenuhi beban puncak (*peak / load shaving*)

Perusahaan listrik biasanya membebankan biaya yang lebih mahal ke pelanggan industri selama periode beban puncak, maka seringkali lebih ekonomis bila teknologi DG dipasang untuk tujuan ini. Generator ini juga biasanya dinyalakan ketika harganya lebih murah bila dibandingkan dengan membeli listrik dari grid. Instalasi *on-site generation* juga menguntungkan pihak *utility*. Dalam banyak kasus dimana kapasitas mendekati level maksimum, *utility* umumnya membutuhkan lebih banyak unit pembangkit, yangmana seringkali menjadi lebih mahal. Akan tetapi, jika pelanggan memakai *on site generator*, maka masalah ini dapat dihilangkan.

3. Pemenuhan beban dasar (*base load generation*)

Pada beberapa kasus, perusahaan memutuskan menggunakan DG untuk memenuhi kebutuhan beban dasar, yaitu dengan menggunakan *on-site generation* sepanjang waktu dan membeli daya ekstra yang dibutuhkan dari grid. Hal ini dilakukan pada sebuah perusahaan yang menggunakan *wind* atau *solar power generator* sebagai sumber energinya. Karena output generator ini sangat bervariasi, sehingga perusahaan tersebut membutuhkan tambahan daya dari grid.

2.4 Dampak DG Pada Sistem

Seperti yang telah disebutkan diatas, pemasangan DG tentu memberikan dampak pada sistem, antara lain :

1. Pengaruh terhadap Keandalan / Reliabilitas Sistem

DG berpotensi digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Sebagai contoh, DG dapat digunakan secara langsung untuk mendukung level tegangan lokal dan menghindari adanya pemadaman yang terjadi karena gangguan pada sistem. DG dapat meningkatkan keandalan dengan meningkatkan keberagaman pilihan catu daya. DG juga dapat meningkatkan keandalan secara tidak langsung dengan mengurangi *stress* pada komponen jaringan sehingga keandalan masing-masing komponen dapat ditingkatkan. Sebagai contoh, DG dapat mengurangi jumlah jam dimana transformator gardu bekerja pada level suhu yang tinggi, sehingga dapat memperpanjang umur pakai transformator yang pada akhirnya dapat meningkatkan keandalan komponen ini.

2. Pengaruh terhadap keandalan secara langsung.

DG dapat memperbanyak keberagaman suplai yang berakibat pada peningkatan kecukupan (*adequacy*) sistem secara keseluruhan. Menurut Apt dan Morgan [57]: “beberapa analisis menunjukkan bahwa jaringan yang terdistribusi (*distributed network*) dengan sumber-sumber daya yang lebih kecil dapat menghasilkan tingkat kecukupan yang lebih besar dibandingkan dengan sistem yang tersentralisasi dengan sumber-sumber daya yang jumlahnya lebih sedikit, sehingga dapat mengurangi besar dan durasi kegagalan. Akan tetapi, perlu dicatat bahwa unit terdistribusi yang berdiri sendiri tanpa backup dari grid dapat menurunkan tingkat *adequacy* ini secara signifikan”.

Berdasarkan hasil dari Hegazy [58] yang memodelkan sebuah *feeder* dengan lima sistem DG dengan tingkat kegagalan dan laju perbaikan yang bervariasi dengan menggunakan teknik Monte Carlo dan dengan menggunakan beban yang tidak terlayani sebagai ukuran keandalan, didapatkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa DG dapat meningkatkan kapasitas sistem distribusi secara keseluruhan dan dapat digunakan sebagai alternatif dari pelaksanaan perluasan gardu (substation) ketika terjadi peningkatan permintaan daya listrik.

3. Pengaruh terhadap keandalan secara tidak langsung.

DG dapat meningkatkan keandalan sistem dengan mengurangi jumlah pemadaman yang disebabkan karena adanya *power outage* atau peralatan perusahaan listrik yang kelebihan beban. Sebagai contoh, selama periode beban puncak, arus yang lebih besar dapat mengakibatkan terjadinya gangguan pada transformator dan peralatan lainnya, yang dapat mengakibatkan terjadinya gangguan aliran daya. Pemadaman ini biasanya dikarenakan kegagalan peralatan yang terjadi secara tiba-tiba yang mengakibatkan peningkatan beban pada peralatan lain. DG dapat digunakan untuk mengurangi jumlah kegagalan per tahun ketika peralatan distribusi digunakan didekat rating nameplatnya, dan oleh karenanya dapat mengurangi frekuensi kegagalan peralatan dan pemadaman.

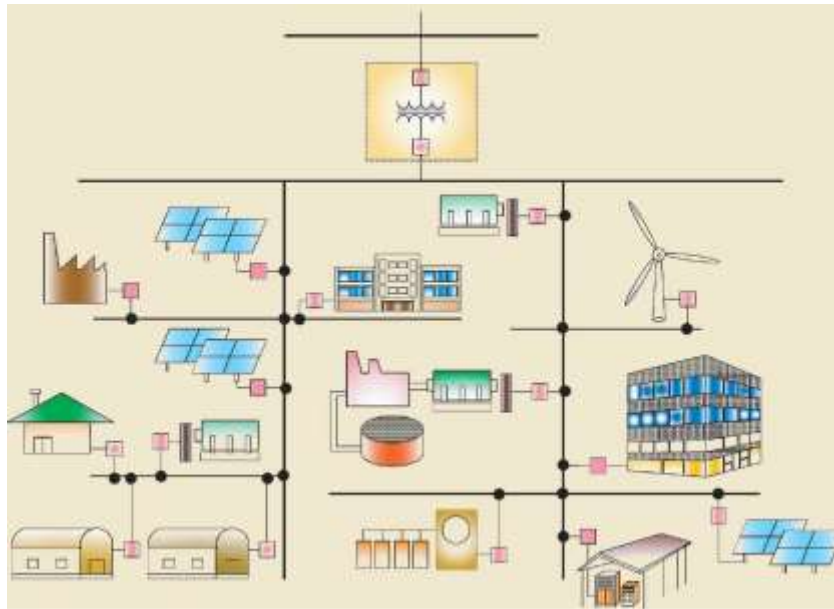
4. Pengaruh pada kualitas daya (*power quality*).

Instalasi dan koneksi DG dapat mempunyai pengaruh positif terhadap kualitas daya. Akan tetapi pengaruh buruk yang mungkin timbul juga harus diperhatikan. Unit DG mungkin dapat mempengaruhi frekuensi sistem. Karena unit DG tidak dilengkapi dengan load-frequency control, maka unit DG tersebut tidak dapat membantu upaya operator jaringan transmisi atau badan pengawas untuk mempertahankan frekuensi sistem. Oleh karena itu, menghubungkan sejumlah besar unit DG ke jaringan harus dievaluasi dan direncanakan secara hati-hati

Selain itu, pemasangan unit DG pada jaringan distribusi juga dapat mempunyai pengaruh buruk pada tingkat tegangan lokal. Naiknya level tegangan pada sistem distribusi radial dapat dipandang sebagai salah satu masalah teknis yang dimiliki oleh DG, khususnya untuk sistem yang dibebani dengan beban yang ringan.

Perkembangan DG dimasa sekarang didukung oleh dua isu utama dalam sistem tenaga listrik pada masa sekarang, yaitu :

1. Kebijakan lingkungan yang berkelanjutan yang mengharapkan pemanfaatan DG dapat membantu mengurangi gas emisi terutama emisi karbon. Pemanfaatan energi DG harus mendorong pengurangan emisi karbon karena umumnya teknologi DG memiliki emisi karbon yang rendah bahkan ada yang emisi karbonnya nol seperti *photovoltaic* (sel surya).



Gambar 2.5 Microgrid dan Beban yang Terhubung pada Grid Distribusi [56].

2. Perubahan kebijakan energi listrik di seluruh dunia dari sistem monopoli menjadi sistem yang lebih kompetitif terkhusus pada sektor pembangkit.
3. Memungkinkan keragaman dalam kepemilikan aset pembangkit sehingga akan adanya persaingan yang mendorong harga energi listrik menjadi lebih murah.

2.5 Komponen Interkoneksi DG

Secara garis besar, interkoneksi DG terbagi atas tiga komponen, yaitu:

1. Sumber Energi Utama (*Prime Energy Source*).

DG sebagai sumber energi utama menunjuk pada teknologi DG sebagai sumber energi seperti energi surya, angin, mikrohidro, pasang surut dan biomassa. Setiap teknologi DG memiliki karakter yang berbeda-beda dalam menghasilkan energi, misalnya tipikal energi yang dihasilkan oleh PV dan fuel cell berupa direct current atau wind turbin yang tipikal energinya berupa energi mekanis (dihasilkan dari putaran pada turbin).

2. Power Converter

Power converter dalam interkoneksi, berfungsi untuk mengubah energi dari sumber energi utama (*prime energy resources*) menjadi energi dengan level

frekuensi tertentu (50Hz - 60Hz). Secara garis besar, ada 3 kategori power converter yang digunakan dalam interkoneksi, yaitu: generator sinkron, generator induksi dan static power converter. Generator sinkron dan generator induksi mengkonversi putaran energi mekanis ke dalam tenaga listrik dan sering disebut dengan *rotating power converter*. *Static power converter* (biasa dikenal dengan inverter) tersusun atas solid device seperti transistor. Pada inverter, transistor mengkonversi energi dari sumber menjadi energi dengan frekuensi 50-60Hz dengan switching (*switch on-off*). Teknologi DG yang dijual di pasaran, kebanyakan telah diintegrasikan dengan power converter masing-masing. Misalnya fuel cell yang telah diintegrasikan dengan inverter. Power converter memiliki efek yang besar terhadap DG pada sistem distribusi. Oleh sebab itu dibutuhkan peralatan interkoneksi untuk menjamin keamanan dan kestabilan operasi. Generator sinkron, generator induksi dan inverter memberikan respon yang sangat berbeda terhadap variasi kondisi dari sistem tenaga.

3. Sistem Interface dan Peralatan Proteksi

Peralatan ini ditempatkan sebagai penghubung antara terminal output dari power converter dan jaringan primer. Komponen interkoneksi ini biasanya terdiri atas step-up transformer, metering kadang ditambahkan controller dan relay proteksi. Dalam komponen ini terkadang terdapat *communication link* untuk mengontrol kondisi pada sistem. Adapun beberapa teknologi DG yang sering digunakan adalah *microhydro*, panel surya, turbin angin, mesin diesel, sel bahan bakar dan baterai yang terdiri dari sejumlah modul-modul kecil dan dirakit secara tersendiri oleh pabrik. Hal ini dilakukan untuk mempermudah konstruksi dan implementasi pada lokasi DG. Modul-modul kecil tersebut dapat dipasang dengan sangat cepat di lokasi akhir, dimana pemasangan pembangkit membutuhkan penghematan waktu yang sangat signifikan bila dibandingkan dengan pembangunan pembangkit tenaga listrik besar yang letaknya terpusat pada suatu lokasi tertentu. Modul-modul DG tersebut dapat segera beroperasi setelah dipasang pada lokasi. Masing-masing modul juga bersifat independen, ketika satu modul mengalami kerusakan, maka modul yang lain dapat tetap bekerja secara normal. Hal inilah yang menyebabkan nilai DG yang lebih baik dibandingkan dengan pembangkit sentral pada umumnya.

2.6 Keuntungan DG sebagai Sumber Energi.

Dalam banyak penelitian, DG dapat beradaptasi dengan perubahan ekonomi dengan cara yang fleksibel karena ukurannya yang kecil dan konstruksi yang lebih sederhana dibandingkan dengan pusat-pusat pembangkit konvensional. .

Beberapa keuntungan dalam pemakaian DG meliputi:

1. DG sebagai sumber energi lokal dapat membantu untuk penghematan daya. DG yang pemasangannya berada dekat dengan daerah beban dapat meningkatkan keandalan dalam pemanfaatan daya.
2. Dalam memproduksi energi listrik, DG bersifat ramah lingkungan. Emisi yang dihasilkan dari produksi energi listrik oleh DG tergolong rendah, bahkan mendekati nol.
3. Dibandingkan dengan pembangkit termal, DG memiliki efisiensi yang lebih tinggi dalam penyaluran daya. Selain itu, bila dikoneksikan pada jaringan, DG dapat meningkatkan efisiensi sistem karena pemasangan DG dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran.
4. DG dapat terintegrasi dalam microgrid, sehingga dapat melayani beban secara mandiri maupun terhubung dengan grid jaringan distribusi.

2.7 Sistem Distribusi.

Pembangkit listrik terdistribusi pada umumnya ditempatkan pada saluran distribusi. Sistem transmisi dan distribusi ialah jaringan listrik antara pusat pembangkit sampai dengan pusat beban. Tegangan yang dibangkitkan oleh generator biasanya berkisar antara 6 kV sampai 20 kV . Untuk mencegah kerugian daya yang besar pada saat mengirim daya listrik dari pembangkit melalui jaringan transmisi ke pusat-pusat beban yang letaknya sangat jauh dari pembangkit maka sebelum ditransmisikan, tegangan ini dinaikkan terlebih dahulu menjadi 70 kV sampai 500 kV. Sistem distribusi yang merupakan bagian dari sistem tenaga listrik, berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen.

Fungsi distribusi tenaga listrik adalah:

1. Sebagai pembagi atau penyalur daya listrik ke beberapa tempat (pelanggan).

2. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Menurut susunan rangkaiannya sistem distribusi dibedakan menjadi dua yaitu sistem *distribusi primer* dan *sistem distribusi sekunder*.

Jaringan Sistem Distribusi Primer.

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban.

Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer, yaitu:

1. Jaringan distribusi radial, dengan model: radial tipe pohon, radial dengan tie dan switch pemisah, radial dengan pusat beban dan radial dengan pembagian fasa area.
2. Jaringan distribusi ring (loop), dengan model: bentuk open loop dan bentuk close loop.
3. Jaringan distribusi Jaring-jaring (NET).
4. Jaringan distribusi spindle.
5. Saluran radial interkoneksi

Jaringan Sistem Distribusi Sekunder.

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung dihubungkan kepada konsumen.

Saat ini tenaga listrik merupakan kebutuhan yang utama, baik untuk kebutuhan sehari-hari maupun industri. Hal ini karena tenaga listrik mudah untuk ditransportasikan dan dikonversikan ke dalam bentuk energi lain. Penyediaan

listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan listrik. Dalam pemenuhan kebutuhan tenaga listrik tersebut, terjadi pembagian beban yang pada awalnya merata tetapi karena ketidakserempakan waktu penyalan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Selain ketidakserempakan pemakaian beban, pengkoneksian yang tidak seimbang pada fase *R*, *S* dan *T* juga merupakan faktor lain yang mempengaruhi. Ketidakseimbangan beban dapat menimbulkan rugi-rugi, secara teknis hal ini sangat merugikan. Agar tercapai penyuplaian listrik yang stabil dan kontinyu ke konsumen, maka hal tersebut harus dapat diatasi. Rugi-rugi karena beban tak seimbang disebabkan adanya arus yang mengalir pada kawat netral. Idealnya arus yang mengalir di sepanjang kawat netral adalah nol, tetapi karena pengaruh dari beban yang tak seimbang maka kawat netral akan berarus. Sedangkan kawat netral merupakan konduktor yang memiliki nilai resistansi, sehingga arus yang melalui kawat ini sebagian berubah menjadi panas yang didisipasikan ke lingkungan sekitar sebagai rugi-rugi daya.

Jaringan Sistem Distribusi Radial.

Sistem distribusi dibagi menjadi dua menurut level tegangannya yaitu jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR). JTM merupakan sistem distribusi dengan level tegangan 20 KV yang biasa digunakan oleh pelanggan industri. Sedangkan JTR merupakan sistem distribusi dengan level tegangan 380/220 KV untuk pelanggan rumah tangga. Untuk menurunkan tegangan JTM menjadi tegangan JTR digunakan transformator step down yang terpasang pada tiang distribusi atau biasa disebut dengan trafo tiang.

Menurut bentuk rangkaiannya, suatu jaringan sistem distribusi dapat dibedakan menjadi beberapa tipe seperti jaringan tipe mesh, loop, maupun radial. Perkembangan sistem kelistrikan terjadi pada sistem distribusi sehingga akan selalu terjadi perubahan bentuk dan kapasitas peralatan maupun beban seiring penambahan beban. Oleh karena itu jaringan radial merupakan tipe jaringan yang umum digunakan pada sistem distribusi. Jaringan radial merupakan tipe jaringan yang berbentuk paling sederhana dan murah. Secara sederhana bentuk jaringan ini berupa sumber yang menyuplai beban-beban di bawahnya secara mengakar dan

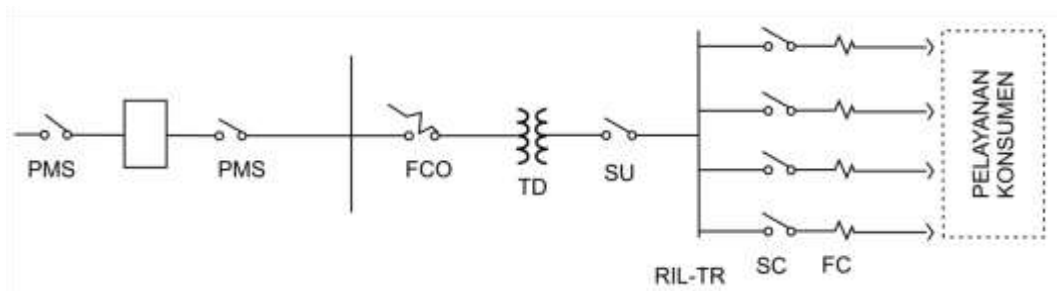
bercabang-cabang tanpa membentuk hubungan loop. Sehingga bentuk jaringan radial ini tampak seperti cabang pohon dengan jalur utama yang terhubung ke rangkaian yang lebih kecil dan menuju beban.

Jaringan distribusi disebut jaringan distribusi radial, bila diantara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (*line*), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

1. Bentuknya sederhana.
2. Biaya investasinya relatif murah.
3. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
4. Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami pemadaman total.

Jaringan distribusi radial ini memiliki beberapa bentuk modifikasi, antara lain:

1. Radial tipe pohon.
2. Radial dengan tie dan switch pemisah.
3. Radial dengan pusat beban.
4. Radial dengan pembagian fasa area.



Gambar 2.6 Komponen Saluran Distribusi Sekunder

Sistem distribusi radial merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik selain pembangkitan dan transmisi yang merupakan tahap terakhir penyaluran tenaga listrik dari pembangkit ke beban. Sistem distribusi menghubungkan gardu induk dari transmisi menuju pelanggan atau beban. Pada sistem distribusi ini digunakan transformator (trafo) *step down* untuk menurunkan tegangan transmisi agar sesuai dengan tegangan peralatan pelanggan rumah tangga dan industri.

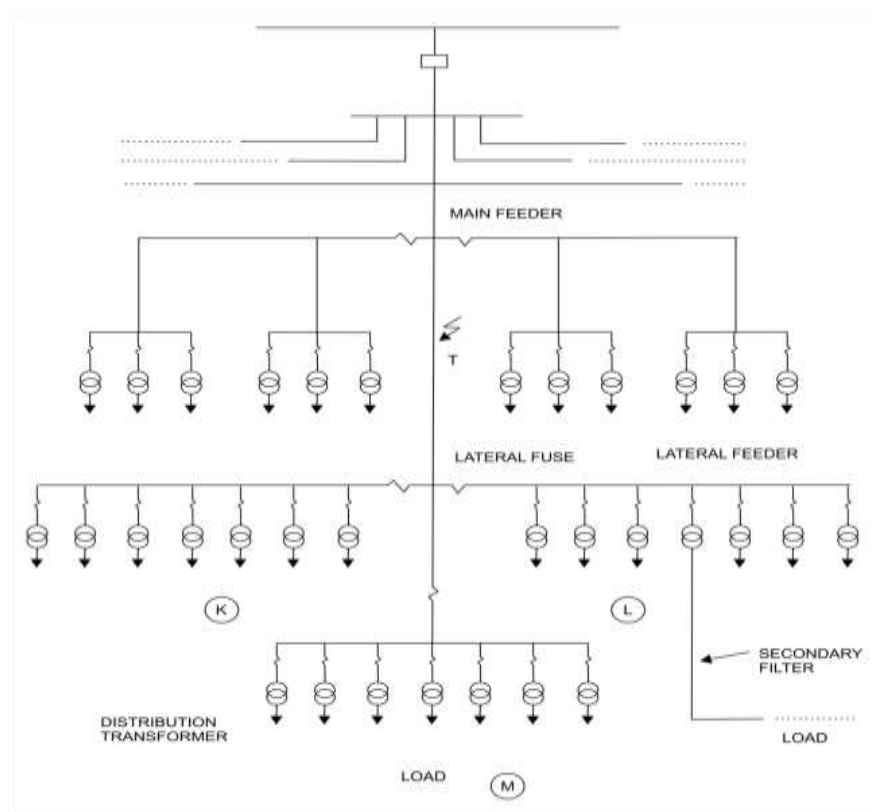
Jika ditinjau dari sisi keandalan, jaringan radial memiliki keandalan yang lebih rendah dibanding tipe jaringan lain. Apabila terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu penyulang pada jaringan radial ini maka akan menyebabkan kegagalan suplai pada jaringan di bawahnya akibat saluran tunggal yang terputus. Namun jika dilihat dari bentuknya, maka jaringan ini merupakan jaringan yang paling sederhana sehingga lebih mudah dalam menerapkan koordinasi sistem pengamanan.

Pada sistem distribusi radial ini, penambahan beban akan mengakibatkan rugi-rugi daya yang semakin besar pada sistem. Oleh karena saluran sistem distribusi radial bersifat memanjang lurus dari sebuah sumber menuju beban maka arus yang mengalir pada saluran dekat dengan sumber lebih besar dibandingkan dengan arus yang mengalir pada beban.

Komponen saluran distribusi sekunder seperti ditunjukkan pada gambar berikut:

Jaringan Radial Tipe Pohon.

Jaringan radial tipe pohon (gambar 2.7) merupakan bentuk yang paling dasar. Satu saluran utama dibentang menurut kebutuhannya, selanjutnya dicabangkan dengan saluran cabang (lateral penyulang) dan lateral penyulang ini dicabang-cabang lagi dengan sublateral penyulang (anak cabang). Sesuai dengan kerapatan arus yang ditanggung masing-masing saluran, ukuran penyulang utama adalah yang terbesar, ukuran lateral adalah lebih kecil dari penyulang utama, dan ukuran sub lateral adalah yang terkecil.



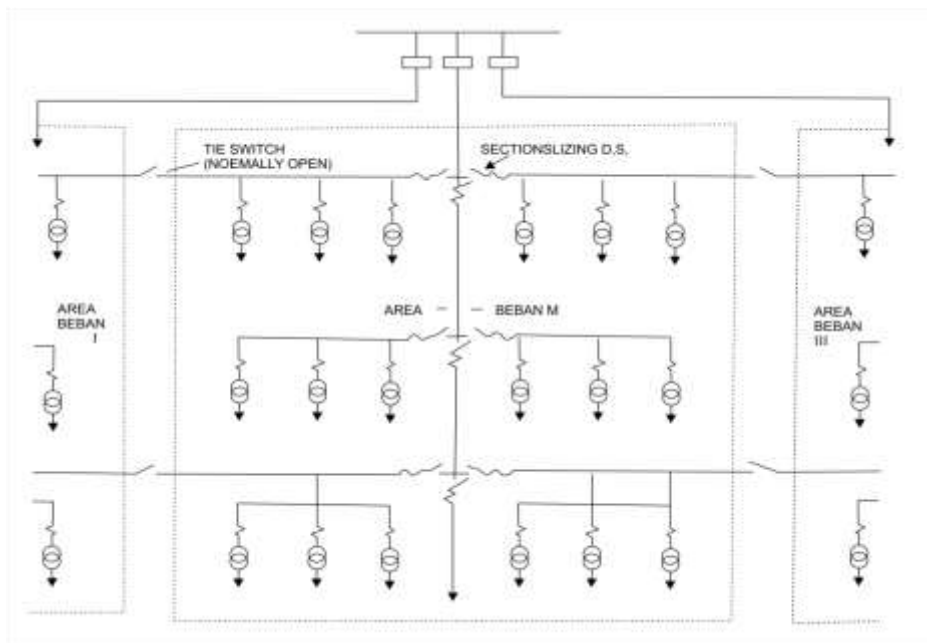
Gambar 2. 7 Jaringan distribusi radial tipe pohon

Jaringan radial dengan tie dan switch pemisah.

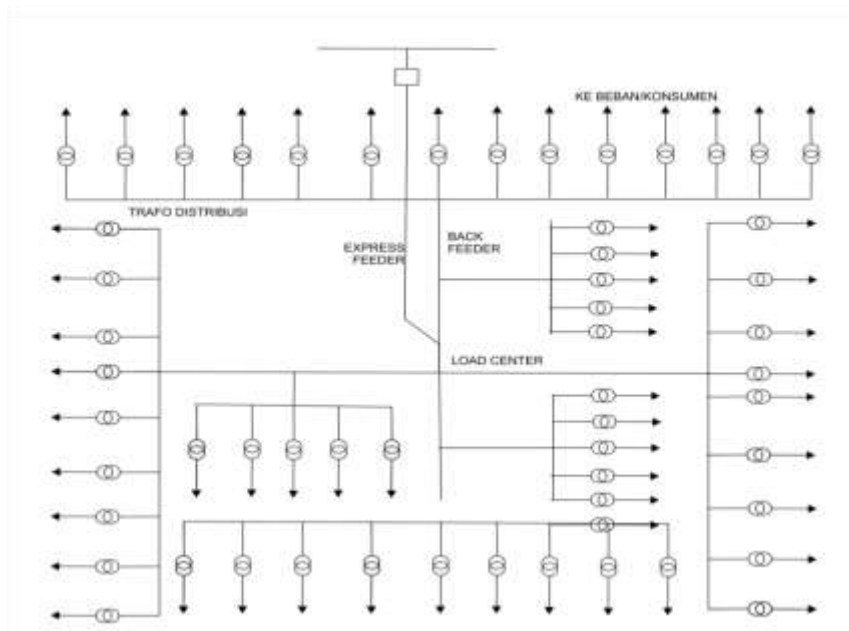
Jaringan radial dengan tie dan switch (gambar 2.8) merupakan modifikasi bentuk dasar dengan menambahkan tie dan switch pemisah, yang diperlukan untuk mempercepat pemulihan pelayanan bagi konsumen, dengan cara menghubungkan area-area yang tidak terganggu pada penyulang yang bersangkutan, dengan penyulang di sekitarnya. Dengan demikian bagian penyulang yang terganggu dilokalisir, dan bagian penyulang lainnya yang sehat segera dapat dioperasikan kembali, dengan cara melepas switch yang terhubung ke titik gangguan, dan menghubungkan bagian penyulang yang sehat ke penyulang di sekitarnya.

Jaringan Distribusi Radial Tipe Pusat Beban.

Jaringan radial tipe pusat beban (gambar 2.9) mencatu daya dengan menggunakan penyulang utama (main feeder) yang disebut *express feeder* langsung ke pusat beban, dan dari titik pusat beban ini disebar dengan menggunakan *back feeder* secara radial.



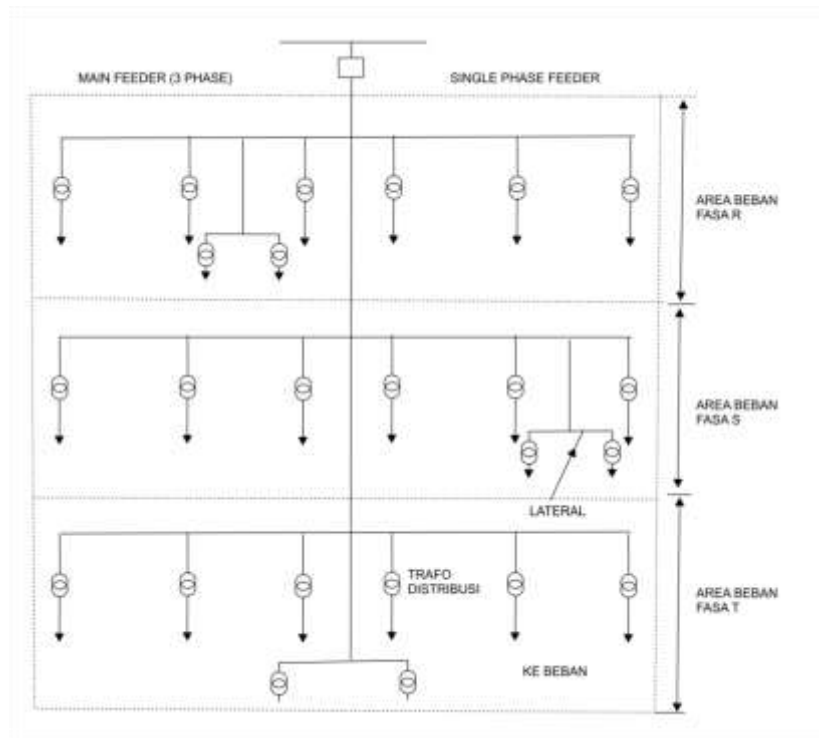
Gambar 2.8 Jaringan distribusi radial dengan tie dan switch pemisah.



Gambar 2.9 Jaringan distribusi radial tipe pusat beban.

Jaringan Distribusi Radial dengan Fasa Area.

Jaringan radial dengan fasa area (gambar 2.10) masing-masing fasa dari jaringan bertugas melayani daerah beban yang berlainan. Bentuk ini akan dapat menimbulkan akibat kondisi sistem 3 fasa yang tidak seimbang (simetris), bila



Gambar 2.10 Jaringan distribusi radial dengan fasa area.

digunakan pada daerah beban yang baru dan belum mantap pembagian bebannya. Karenanya hanya cocok untuk daerah beban yang stabil dan penambahan maupun pembagian bebannya dapat diatur merata dan simetris pada setiap fasanya

2.8 Studi Aliran Daya (*Power Flow Study*).

Sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem yang mengatur, membangkitkan, menyalurkan, dan membagi sampai pada akhirnya memanfaatkan tenaga listrik tersebut. Kondisi sistem tenaga listrik yang ideal adalah jika daya yang dibangkitkan oleh pembangkit sesuai dengan daya yang dibutuhkan sistem. Suatu sistem kelistrikan pada kenyataannya terdiri dari banyak bus yang terhubung satu sama lain sehingga dibutuhkan perhitungan khusus untuk mendapatkan solusi analisis aliran daya. Analisis aliran daya merupakan sebuah studi yang penting dan mendasari analisis lebih lanjut pada sistem tenaga. Analisis aliran daya akan mendapatkan parameter dasar dari sebuah sistem seperti tegangan bus, arus saluran, daya aktif dan reaktif pada saluran, faktor daya hingga rugi-rugi daya. Parameter-parameter tersebut merupakan informasi yang penting untuk dapat mengevaluasi kondisi dan kualitas suatu sistem seperti

peralatan, saluran, beban, maupun pembangkitan sehingga diperlukan sebagai dasar dalam melakukan perbaikan dan perkembangan sistem. Langkah awal dalam melakukan analisis aliran daya adalah mengumpulkan data sistem berupa data pembangkit, data transformator, data impedansi saluran dan data beban. Data pembangkit (generator) meliputi data daya aktif (P) dalam satuan (MW), daya reaktif (Q) dalam satuan (MVAR), tegangan V (KV), reaktansi sinkron $X(\Omega)$. Data transformator meliputi kapasitas tiap trafo dalam satuan Megavolt Ampere (MVA), tegangan (V) dalam satuan Kilovolt (KV) dan reaktansi bocor (X) dalam satuan Ohm (Ω). Data saluran transmisi meliputi impedansi dalam satuan ohm yang terdiri dari resistansi (R) dan reaktansi (X). Data beban meliputi daya aktif (P) dalam satuan MW dan daya reaktif (Q) dalam satuan MVAR.

Tujuan studi aliran daya adalah :

1. Untuk mengetahui tegangan – tegangan pada setiap bus yang ada dalam sistem.
2. Untuk mengetahui kondisi semua peralatan apakah memenuhi batas–batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.
4. Untuk memperoleh kondisi awal bagi studi selanjutnya seperti perhitungan hubung singkat, stabilitas, koordinasi proteksi dan pembebanan ekonomis.

Solusi aliran daya untuk sistem tiga fasa pada umumnya diperoleh dengan asumsi kondisi jaringan dan beban seimbang. Oleh sebab itu, sebagian besar penelitian diarahkan pada jenis aliran daya ini. Asumsi ini, bagaimanapun tidak selalu berlaku karena adanya pembebanan yang tidak seimbang, kurangnya transposisi yang lengkap, dan pengoperasian pengendali yang tidak seimbang terutama pada sistem distribusi. Solusi langsung di atas, yang mungkin terjadi dalam sistem yang seimbang, tidak mungkin terjadi pada sistem yang tidak seimbang. Oleh karena itu, proses solusi tiga fasa iteratif yang lengkap diperlukan untuk menghitung tegangan pada pada setiap bus.

Persamaan aliran daya tiga fasa dari sistem dua bus untuk beban tidak seimbang dengan garis dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta P_i^p = P_{i_gen}^p - P_{i_load}^p - P_i^p \quad (2.1)$$

$$\Delta Q_i^p = Q_{i_gen}^p - Q_{i_load}^p - Q_i^p \quad (2.2)$$

Dimana P_i^p , $P_{i_gen}^p$, $P_{i_load}^p$ adalah daya aktif, daya aktif yang dibangkitkan generator, daya aktif beban pada fasa p di bus i. Dimana Q_i^p , $Q_{i_gen}^p$, $Q_{i_load}^p$ adalah daya reaktif, daya reaktif yang dibangkitkan generator, daya reaktif beban pada fasa p di bus i.

$$P_i^p = \left| V_i^p \left| \sum_{n=1}^k \sum_{c=a}^m V_k^m \right| \right| \left[G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right] \quad (2.3)$$

$$Q_i^p = \left| V_i^p \left| \sum_{n=1}^k \sum_{c=a}^m V_k^m \right| \right| \left[G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right] \quad (2.4)$$

Jacobian matrix dari analisa aliran daya Newthom Raphson dapat gambar sebagai berikut:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta(rst)} & \frac{\partial P}{\partial V(rst)} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta(rst)} & \frac{\partial Q}{\partial V(rst)} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Distribusi sistem tenaga listrik merupakan salah satu bagian dari sistem penyaluran daya listrik yang memiliki karakteristik khusus. Berbeda dengan saluran transmisi, saluran distribusi hanya menggunakan level tegangan menengah sehingga drop tegangan yang terjadi pada saluran relatif besar dan umumnya menggunakan sistem jaringan radial. Selain itu saluran distribusi merupakan bagian dari penyaluran daya yang langsung terhubung dengan beban, sehingga menyebabkan ketidak seimbangan sistem akibat beban yang tidak seimbang sangat berpengaruh. Dalam melakukan analisis pada suatu sistem termasuk pada saluran distribusi, hal pertama yang harus dilakukan adalah menganalisis aliran daya.

Beberapa metoda yang umum digunakan untuk melakukan analisis aliran daya diantaranya Newton Raphson, Gauss-Seidel, dan Fast Decoupled. Ketiga metoda klasik tersebut memiliki ketepatan yang tinggi untuk digunakan pada saluran transmisi. Namun jika digunakan untuk saluran distribusi ketiga metoda ini memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah bahkan tidak akan mencapai konvergen. Karena saluran distribusi memiliki cabang yang sangat banyak dan

rasio R/X yang tinggi (R lebih dominan). Metoda analisis aliran daya klasik umumnya juga digunakan untuk analisis aliran daya yang seimbang. Artinya komponen beban tiap fasa diasumsikan dalam keadaan seimbang. Dalam saluran distribusi komponen ketidak seimbangan beban harus diperhatikan terutama untuk tujuan monitoring beban. Dari beberapa alasan tersebut maka diperlukan analisis aliran daya yang dapat melakukan analisis aliran daya tiga fasa sekaligus dan memiliki akurasi yang tinggi untuk saluran distribusi radial. Analisa dan evaluasi aliran daya sangat penting untuk sistem distribusi. Begitu juga untuk sistem distribusi radial. Banyak faktor yang mempengaruhi sistem distribusi radial, salah satunya adalah naik turunnya beban.

2.9 Teori Unit Commitment.

Unit Commitment (UC) adalah proses optimasi untuk memutuskan status suatu generator (*on* atau *off*) dan menentukan daya output dari beberapa pembangkit. Optimasi ini harus memenuhi beberapa batasan (*constrain*) seperti keseimbangan daya, cadangan daya dan batasan masing-masing generator seperti batas unit output, minimum dan maksimum output, *ramp rate* dan *minimum up/down time* [5]. Secara umum fungsi tujuan dari masalah UC adalah meminimalkan biaya pembangkitan, yaitu biaya bahan bakar dan biaya start up pembangkit (*start up cost*).

Formulasi UC secara umum untuk pembangkit yang thermal:

$$\min F_H = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N [F_{ih}(P_{ih}) + ST_{ih}(1 - u_{i(h-1)})] u_{ih} \quad (2.6)$$

Dimana :

$$F_{ih}(P_{ih}) = c_i(P_{ih})^2 + b_i(P_{ih}) + a_i \quad (2.7)$$

$$ST_{ih} = \begin{cases} HSC_i, & \text{jika } MDT_i \leq T_i^{off} \leq MDT_i + CSH_i \\ CSC_i & \text{jika } T_i^{off} > MDT_i + CSH_i \end{cases} \quad (2.8)$$

Batasan:

1. Total daya yang dibangkitkan sama dengan total beban

$$\sum_{i=1}^N P_{ih} U_{ih} = D_h$$

2. Cadangan daya berputar (Spining Reserve)

$$\sum_{i=1}^N P_{ih} u_{ih} \geq D_h + R_h$$

3. Unit output constrain

$$P_{i(min)} \leq P_{ih} \leq P_{i(max)}$$

4. Unit max ramp up/down rate:

$$-MRU_i \leq P_{t,i} - P_{t+1,i} \leq MRD_i$$

5. Minimum up time (MUT) limit

$$T_i^{on} \geq MUT_i$$

6. Minimum down time (MDT) limit

$$T_i^{off} \geq MDT_i$$

Penempatan DG pada saluran distribusi akan sangat berbeda cara penjadwalan pembangkitnya dan perhitungan pembebanan pada setiap unit pembangkitnya. Sehingga biaya pembangkitan pada saluran distribusi akan terdiri dari tiga bagian yaitu : biaya dari daya yang dibangkitkan oleh pembangkit thermal yang merupakan daya keluaran dari grid utama dan biaya pembangkitan daya DG. Sehingga persamaan biaya total pembangkitan akan menjadi:

$$\min F_H = \sum_{k=1}^K F_{kh} + F_{ih} \quad (2.9)$$

dimana

F_H : biaya total pembangkitan selama H jam.

F_{kh} : biaya daya dari DG pada jam h.

F_i : biaya daya dari pembangkit thermal (dari grid utama) pada jam h.

Persamaan umum biaya bahan bakar DG :

$$F_{kh}(P_{kh}) = c_k(P_{kh})^2 + b_k(P_{kh}) + a_k \quad (2.10)$$

dimana : $F_{kh}(P_{kh})$: biaya bahan bakar dari DG (\$/h) pada jam h

a_k, b_k, c_k : koefisien bahan bakar dari DG k

P_{kh} : daya yang dibangkitkan DG k (MW) pada jam h

Keseimbangan daya dengan menambahkan DG dan baterai menjadi :

$$\sum_i P_{ih} + \sum_k P_{kh} + P_{Bh} = P_{Dh} + P_{loss} \quad (2.11)$$

dimana:

$\sum_i P_{ih}$: total daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit thermal

$\sum_k P_{kh}$: total daya dari DG.

P_{Dh} : total beban (MW)

P_{loss} : rugi-rugi dari sistem (MW)

P_{Bh} : daya dari baterai.

2.10 Teori Metode Quantum Evolutionary (QEA) [47-51].

Metode quantum evolutionary didasari oleh konsep quantum bit (qubit) dan superposisi dari bentuk kuantum mekanik. Informasi terkecil disimpan dalam dua bentuk bilangan kuantum yang disebut kuantum bit atau kubit. Kubit mungkin ada pada keadaan/status '1' atau '0', atau superposisi dari keduanya. Status dari kubit dapat ditunjukkan seperti persamaan berikut:

$$|\psi\rangle = |\alpha|^2 + |\beta|^2 \quad (2.12)$$

dimana α and β adalah bilangan kompleks yang sesuai dengan probabilitas amplitudo dari state tersebut. Normalisasi dari state adalah :

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (2.13)$$

QGA didasarkan dari konsep kubit. Satu kubit didefinisikan terdiri dari pasangan bilangan (α, β) sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Yang mana persamaan ini merupakan karakteristik dari persamaan (2.12) dan (2.13).

Untuk m kubit direpresentasikan seperti matrik berikut :

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_m \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1, i = 1, 2, 3 \dots m$$

Representasi ini mempunyai keunggulan yaitu mampu untuk merepresentasikan beberapa superposisi dari state.

Untuk pengertian yang lebih mudah diberikan contoh sebagai berikut:

tiga kubit dengan tiga pasang bilangan seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1.0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Tiga pasang bilangan diatas ini dapat merepresentasikan keadaan :

$$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}|000\rangle + 0|001\rangle + \frac{1}{2\sqrt{2}}|010\rangle + 0|011\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}|100\rangle + 0|101\rangle + \frac{1}{2\sqrt{2}}|110\rangle + 0|111\rangle$$

Hasil ini menunjukkan bahwa probabilitas state/keadaan $|000\rangle, |010\rangle, |100\rangle$ dan $|110\rangle$ adalah $\frac{3}{8}, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}$ dan $\frac{1}{8}$.

Tiga sistem kubit dari persamaan (2.16) mempunyai empat jenis informasi dalam waktu yang bersamaan. Perhitungan evolutionary dengan merepresentasikan kubit yang mempunyai karakteristik yang beragam, lebih baik dibandingkan dengan pendekatan klasik karena dapat mewakili setiap state. Satu string kubit seperti persamaan (2.16) dapat merepresentasikan empat state (status). Konvergensi juga dapat diperoleh dengan representasi dari qubit. Dengan $|\alpha|^2$ atau $|\beta|^2$ pendekatan ke nilai 1 atau 0, konvergen string qubit ke keadaan tunggal dan memiliki keanekaragaman menghilang secara bertahap. Artinya, representasi qubit dapat memiliki dua karakteristik eksplorasi dan eksploitasi secara bersamaan.

Gerbang rotasi (*Rotation Gate /Q-gate*).

Gerbang Rotasi (Quantum-gate) didefinisikan sebagai operator variasi QEA, dimana operasi qubit diperbarui harus memenuhi kondisi normalisasi, $|\alpha'|^2 + |\beta'|^2 = 1$, dimana α' and β' adalah nilai-nilai qubit yang diperbarui.

Persamaan gate rotasi sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \alpha_j(t+1) \\ \beta_j(t+1) \end{bmatrix} = R_i(t) \times \begin{bmatrix} \alpha_j(t) \\ \beta_j(t) \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (2.17)$$

$$R_i(t) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_i & -\sin \Delta\theta_i \\ \sin \Delta\theta_i & \cos \Delta\theta_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.18)$$

$\Delta\theta_i$ adalah sudut rotasi (gambar 2.11) dari masing-masing anggota populasi. Sudut rotasi $\Delta\theta_i$ adalah terkait dengan perbedaan normalisasi Δf_i antara prestasi dari masing-masing anggota populasi dan global optimal terbaik.

Persamaan untuk $\Delta\theta_i$:

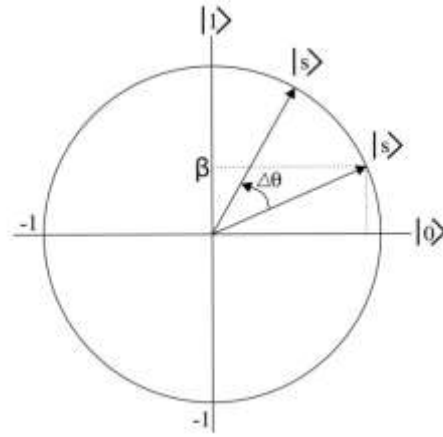
$$\Delta\theta_i = \Delta f_i \times \text{sign}(\alpha_b - \alpha_j) \times \text{sign}[\beta_j \times \sin \Delta f_i - \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i)] \quad (2.19)$$

dimana :

$$\Delta f_i = \pi \times \left(1 - \frac{f(b)}{f(p_i(t))}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.20)$$

$$\text{sign}(\alpha_b - \alpha_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } \alpha_b \geq \alpha_j \\ -1 & \text{if } \alpha_b < \alpha_j \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} & \text{sign}[\beta_j \times \sin \Delta f_i - \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i)] \\ &= \begin{cases} +1 & \text{if } \beta_j \times \sin \Delta f_i \geq \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i) \\ -1 & \text{if } \beta_j \times \sin \Delta f_i < \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.22)$$



Gambar 2.11 Dasar dari quantum bit (kubit)

Quantum Evolutionary Algorithm (QEA) [48].

QEA diimplemetasikan dengan inisialisasi, observasi dan update dari kubit individual. Prosedur terperinci dan mekanisme QEA, untuk memecahkan masalah optimisasi dengan fungsi objektif dan variabel kontrol biner, dijelaskan sebagai berikut:

- Step 1. Tentukan $t = 0$, dimana t adalah *generation counter*.
- Step 2. Inisialisasi $Q(t)$.

$Q(t)$ merepresentasikan grup kubit individual,

Dimana inisialisasi pada $t=0$ dan $Q(t) = [q_1^t, q_2^t, \dots, q_G^t]$, G adalah jumlah Qbit individual dan q_g^t adalah kubit ke g qubit individual pada

$$\text{generasi } t \quad q_g^t = \begin{bmatrix} \alpha_{j1} & \alpha_{j2} & \dots & \alpha_m \\ \beta_{j1} & \beta_{j2} & \dots & \beta_m \end{bmatrix} \quad q_g^t = \begin{bmatrix} \alpha_{g1}^t & \alpha_{g2}^t & \dots & \alpha_{gm}^t \\ \beta_{g1}^t & \beta_{g2}^t & \dots & \beta_{gm}^t \end{bmatrix}$$

Untuk $g = 1, 2, \dots, G$ dan m adalah panjang string. Jika α_{ji} dan β_{ji} untuk $i = 1, 2, \dots, m$ diinisialisasi dengan $1/\sqrt{2}$, probabilitas untuk observasi state 1 atau 0 dari masing-masing qubit adalah sama. Proses observasi adalah untuk menentukan penyelesaian biner dari kubit individual

- Step 3. Tentukan group solusi biner $X(t)$ dengan mengobservasi $Q(t)$, dimana

$$X(t) = [X_1^t, X_2^t, \dots, X_G^t]$$

- a. Proses observasi adalah untuk menentukan penyelesaian biner dari kubit individual. Saat kubit $(\alpha, \beta)^T$ diobservasi, itu berhubungan

dengan karakter biner A dapat ditentukan dengan membandingkan

$|\beta|^2$ untuk menyeragamkan bilangan random $[0,1]$ dan $A =$

$$\begin{cases} 1, & \text{random } [0,1] < |\beta|^2 \\ 0, & \text{atau sebaliknya} \end{cases}$$

- b. Jadi solusi biner X_g^t didapat setelah semua kubit dalam kubit individual diobservasi.

Step 4. Evaluasi $X(t)$.

Nilai *fitness* atau fungsi tujuan dari solusi $X(t)$ dievaluasi.

Step 5. Simpan solusi yang terbaik dari $X(t)$ ke dalam $B(t)$

$B(t)$ adalah matrik untuk menyimpan solusi terbaik dari seluruh populasi.

Step 6. Seting $t = t + 1$

Step 7. Tentukan $X(t)$ dengan mengobservasi $Q(t-1)$

Step 8. Evaluasi $X(t)$ dan simpan solusi yang terbaik dari $X(t)$ dan $B(t-1)$ ke dalam $B(t)$

Step 9. Update $Q(t)$ individual menggunakan *rotation gate*.

Rotation gate adalah operator variasi dari QEA untuk mengupdate qubit dan qubit yang telah di update pada $t(\alpha_{ji}^t, \beta_{ji}^t)$ harus memenuhi kondisi normalisasi yaitu $|\alpha_{ji}^t|^2 + |\beta_{ji}^t|^2 = 1$

$$R_i(t) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{ji} & -\sin \Delta\theta_{ji} \\ \sin \Delta\theta_{ji} & \cos \Delta\theta_{ji} \end{bmatrix}$$

Dimana $\Delta\theta_{ji}$ adalah sudut rotasi yang mana menentukan magnitudo dan arah putaran.

$$\begin{bmatrix} \alpha_{ji}(t+1) \\ \beta_{ji}(t+1) \end{bmatrix} = R_i(t) \times \begin{bmatrix} \alpha_{ji}(t) \\ \beta_{ji}(t) \end{bmatrix}$$

Step 10. Simpan solusi terbaik ke dalam $B(t)$.

Solusi terbaik dari $X(t)$ dan $B(t-1)$ disimpan pada $B(t)$.

Step 11. Jika iterasi sudah mencapai jumlah yang ditentukan, program selesai.

Jika belum kembali ke step 6.

BAB III

PENJADWALAN DAN PEMBEBANAN PEMBANGKIT

3.1 Tahapan Penelitian.

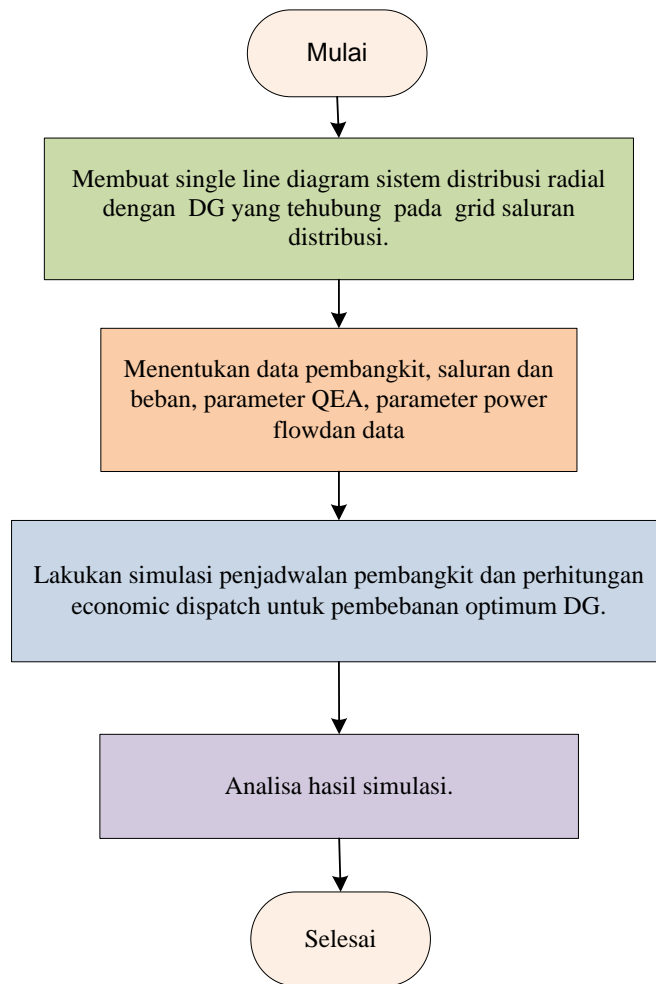
Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian simulasi penjadwalan DG pada jaringan distribusi dimulai dengan melakukan studi literatur. Dengan studi literatur dapat dikembangkan model DG dan model jaringan distribusi. Kemudian dilanjutkan dengan membuat single line diagram dari model sistem distribusi yang tidak seimbang. Menempatkan pembangkit thermal dan DG yang terhubung pada jaringan distribusi. Menentukan data saluran distribusi, data pembangkit (pembangkit thermal, DG dan baterai) dan data beban.

Penjadwalan pembangkit yang melibatkan DG dalam sistem distribusi sangat berbeda dengan penjadwalan pembangkit konvensional. Selain sumber pengiriman konvensional dengan kapasitas yang relatif kecil, sistem distribusi biasanya memiliki beberapa sumber terbarukan seperti turbin angin (*wind turbine/ WT*) dan panel surya (*photovoltaic/ PV*) yang memiliki karakteristik sangat berbeda dari pembangkit listrik thermal atau hidro biasa, dimana pembangkit terbarukan kapasitas pembangkitannya tidak terkontrol, sesuai dengan kondisi lingkungan sekitarnya. Disamping itu, penggunaan baterai menjadikan perhitungan UC semakin lebih kompleks.

Langkah-langkah ini diperlihatkan dalam diagram alir seperti gambar 3.1.

3.2 Studi Literatur.

Karena generator tidak bisa langsung menyala dan menghasilkan tenaga, UC harus direncanakan terlebih dahulu sehingga cukup banyak pembangkit yang siap untuk menangani permintaan beban dengan margin cadangan yang memadai. UC adalah penjadwalan dan pembebanan unit pembangkit dalam sistem tenaga untuk meminimalkan biaya pembangkitan dengan memenuhi kendala yang ada seperti permintaan beban dan persyaratan cadangan sistem selama jangka waktu tertentu[13-15].



Gambar 3.1 Diagram alir tahap-tahap simulasi disertasi

UC klasik ditujukan untuk menentukan jadwal *start-up* dan *shut down* unit termal untuk memenuhi kebutuhan beban perkiraan selama periode waktu tertentu (24 jam sampai 1 minggu) .

Dalam literature, berbagai pendekatan optimasi numerik telah diterapkan untuk menangani masalah UC. Teknik deterministik yang digunakan sebelumnya adalah daftar prioritas (priority list) [27], pemrograman dinamis (dynamic programming) [28-30], relaksasi Lagrangian [31][32], pemrograman mixed-integer [33], dan metode branch-and-bound [34]. Perhitungan UC dengan pendekatan priority list sangat sederhana dan cepat, namun biasanya menghasilkan biaya produksi yang tinggi. Pemrograman dinamis bersifat fleksibel namun kesulitannya pada masalah dimensi tinggi.

Metode branch and bound menggunakan fungsi linier untuk mewakili konsumsi bahan bakar dan biaya start-up yang bergantung pada waktu dan memperoleh batas bawah dan atas yang dibutuhkan. Namun, waktu komputasinya meningkat secara eksponensial dengan selisih dimensi masalah UC. Metode pemrograman mixed-integer menggunakan teknik pemrograman linier untuk memecahkan dan memeriksa solusi bilangan bulat. Tapi itu juga sulit karena membutuhkan waktu komputasi yang lama. Sementara metode relaksasi Lagrangian menawarkan solusi yang lebih cepat, namun mungkin mengalami masalah konvergensi numerik.

Penelitian menggabungkan komputasi evolusioner dan komputasi kuantum dimulai pada akhir tahun 1990an. Komputasi evolusioner kuantum adalah cabang studi tentang perhitungan evolusioner dan menggunakan prinsip mekanika kuantum tertentu, seperti superposisi, gangguan dan ketidakpastian [47-51]. Berdasarkan konsep dan prinsip komputasi kuantum, seperti bit kuantum (qubit), gerbang kuantum (Q-gates/ rotation gate) dan superposisi state, Han dan Kim. mengembangkan algoritma quantum inspired evolusioner (QEA), yang dapat mencapai keseimbangan yang lebih baik antara eksplorasi dan eksploitasi dari ruang solusi dan juga mendapatkan solusi yang lebih baik. Kinerja superior QEA untuk masalah optimasi kombinatorial ditunjukkan pada [48][49]. Metoda ini juga telah digunakan untuk menyelesaikan masalah UC pada sistem yang besar [39][40].

3.3 Unit Commitment pada Sistem Distribusi dengan DG.

Pada sistem distribusi sangat mungkin terdapat beberapa jenis pembangkit. Unit commitment dengan adanya DG sistem distribusi sangat berbeda dengan unit commitment pada sistem tenaga listrik klasik. Selain sumber dispatchable konvensional dengan kapasitas yang relatif kecil, pada sistem biasanya memiliki beberapa sumber terbarukan seperti turbin angin (WT) dan panel surya (photovoltaic/PV), yang memiliki karakteristik yang sangat berbeda dengan generator thermal atau hidro konvensional. Selain itu, penggunaan baterai penyimpanan energi akan menambah kompleksitas kedalam perhitungan UC pada pembangkit yang ada pada sistem distribusi .

Model perangkat yang akan ditampilkan dalam simulasi disertasi sebagai berikut:

3.3.1 Model Panel Surya (PV).

Panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Output daya tergantung pada G insolation matahari dan juga dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Jika kita asumsikan suhu operasi tetap normal. Oleh karena itu output solar panel dapat disajikan sebagai berikut:

$$P_{pv} = \begin{cases} 0, & G < G_{in} \\ \mu \cdot G, & G_{in} \leq G < G_{rate} \\ P_{rate}, & G \geq G_{rate} \end{cases} \quad (3.1)$$

G_{in} dan G_{rate} : minimum dan rated insolation

μ : koefisien solar panel

Sumber energi terbarukan seperti PV diharapkan bekerja pada kondisi output maksimum setiap saat. Oleh karena outputnya hanya tergantung pada lingkungan sekitar dan tidak terkendali. Kurva keluaran time basednya harus diprediksi untuk memasukkan sumber energi tersebut kedalam perhitungan UC .

3.3.2 Model Turbin Angin (wind turbine/ WT).

Daya out put turbin angin/ wind turbine (WT) sangat berhubungan dengan kecepatan angin V_w , yang mana dapat dipresentasikan sebagai:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0, & V_w < V_{in} \\ (a \cdot V_w^2 + b \cdot V_w + c) P_{rate}, & V_{in} \leq V_w < V_{rate} \\ P_{rate}, & V_{rate} \leq V_w < V_{out} \\ 0 & V_w \geq V_{out} \end{cases} \quad (3.2)$$

V_{in} dan V_{out} menyatakan kecepatan turbin cut in and cut out demi alasan keamanan.

P_{rate} , dan V_{rate} menyatakan rating daya dan kecepatan angin.

a , b , c adalah koefisien kurva karakteristik turbin.

3.3.3 Model Turbin Mikro (micro turbine/MT).

Operasi turbin mikro mirip dengan pembangkit thermal yang dibatasi oleh *maximal ramp up* dan *maximal ramp down*, *minimal up time* dan *minimal down time*, minimum dan maksimum daya output. Total biaya operasi mikro turbin terdiri dari biaya bahan bakar, biaya emisi dan biaya startup (*start up cost*).

Fungsi biaya untuk pembangkit yang turbin mikro :

$$F_H = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N [F_{ih}(P_{ih}) + ST_{ih}(1 - u_{i(h-1)})] u_{ih} \quad (3.3)$$

dimana :

$$F_{ih}(P_{ih}) = c_i(P_{ih})^2 + b_i(P_{ih}) + a_i \quad (3.4)$$

$$ST_{ih} = \begin{cases} HSC_i, & \text{jika } MDT_i \leq T_i^{off} \leq MDT_i + CSH_i \\ CSC_i & \text{jika } T_i^{off} > MDT_i + CSH_i \end{cases} \quad (3.5)$$

3.3.3 Model Baterai (*Energy Storage System/ESS*) .

Baterai memainkan peran yang sangat penting dalam pemanfaatan pembangkit energi terbarukan, terutama pada microgrid. Baterai diperlukan pada sistem yang menggunakan sumber energi terbarukan jika total output daya lebih besar dari kebutuhan beban, sehingga kelebihan daya dapat disimpan di baterai. Baterai bertindak sebagai sumber ketika output dari pembangkit konvensional dan sumber terbarukan tidak dapat memenuhi kebutuhan beban dan sebagai beban untuk charging baterai pada saat beban rendah. Secara ekonomis bermanfaat untuk mengisi baterai pada jam diluar beban puncak dan melepaskan energinya pada saat beban puncak untuk memenuhi kebutuhan beban sendiri. Energi yang tersimpan di dalam baterai biasanya diukur dengan State Of Charge (SOC), yang dinotasikan oleh daya P + dan daya habis P - selama jangka waktu tertentu.

$$SOC_{t+i} = SOC_t + \sum_t^{t+i} (P_+ - P_-) \quad (3.6)$$

Baterai tidak menjadi bermuatan lebih (*over charge*). B_m menunjukkan kapasitas baterai :

$$SOC \leq B_m \quad (3.7)$$

Dimasukkannya sumber energi terbarukan , baterai sebagai penyimpan energi dan interkoneksi dengan jaringan utama membuat UC jauh lebih kompleks dari UC untuk sistem konvensional.

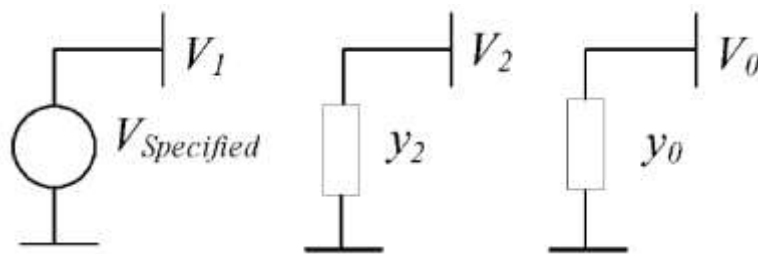
3.4 Studi Aliran Daya Tiga Fasa yang Tidak Seimbang.

Dalam penelitian ini, studi aliran daya Newton Raphson dengan komponen urutan digunakan untuk mengevaluasi aliran daya pada sistem distribusi radial yang tidak seimbang [16][17] .

3.4.1 Model Generator Urutan (Sequence Generator Model).

Gambar 3.2 menunjukkan model generator untuk aliran daya. Model ini direpresentasikan dengan tiga sirkuit urutan *uncoupled*. Reaktansi urutan positif dan emf balik itu tidak diperkenalkan, ini benar-benar menyajikan kasus dalam aliran daya model fasa tunggal.

Jika ada ketidak seimbangan dalam power sistem, arus komponen urutan negatif dan urutan nol akan mengalir dari model generator, menghasilkan tegangan tiga fasa tidak seimbang pada busbar generator.



Gambar 3.2 Model generator komponen urutan

Tabel 3.1 Model transformator komponen urutan[16].

Connection		Equivalent Circuit/Admittance Matrix		
Bus P	Bus S	Positive	Negative	Zero
		P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S
		P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S
		$\begin{bmatrix} y_p & -y_m \angle 30 \\ -y_m \angle -30 & y_s \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} y_p & -y_m \angle -30 \\ -y_m \angle 30 & y_s \end{bmatrix}$	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S
		P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S
		$\begin{bmatrix} y_p & -y_m \angle 30 \\ -y_m \angle -30 & y_s \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} y_p & -y_m \angle -30 \\ -y_m \angle 30 & y_s \end{bmatrix}$	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S
		P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S	P $\xrightarrow{y_{s,c}}$ S

3.4.2 Model Transformator Urutan (*Sequence Transformer Model*).

Model transformator dibuat dengan mengubah matriks admitansi transformator dalam komponen keseluruhan fasa lainnya dikomponen urutan, sebagai berikut:

$$Y_{012} = \begin{bmatrix} T & \\ & T \end{bmatrix}^{-1} Y_{abc} = \begin{bmatrix} T & \\ & T \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

dimana:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ dan } a = \angle 120^\circ$$

Matrik admitansi urutan (6x6) dihasilkan digunakan untuk membangun model transformator komponen urutan yang digunakan untuk membangun matriks admitansi urutan decoupled. Model untuk sambungan transformator yang berbeda dirangkum dalam Tabel 3.1. urutan positif dan jaringan urutan negatif dari transformer pada Tabel 3.1, yang dinyatakan oleh matriks admitansi sebagai pergeseran fasa tidak sesuai dimasukkan dalam sebuah sirkuit yang setara. Dalam Tabel 3.1, jika $y_p - y_m$ dan $y_s - y_m$ tidak diabaikan, rangkaian ekuivalen transformator harus diubah untuk model komponen simetri setara.

3.4.3 Model Saluran Transmisi Urutan (*Sequence Transmission Line Model*).

Ketika saluran seimbang atau ditranspose, matriks admitansi dalam variabel fasa akan penuh dan simetris. Oleh karena itu, saluran transmisi dapat diwakili oleh tiga sirkuit urutan uncoupled sebagai berikut:

$$Y_{012}^Z = \begin{bmatrix} y_{00}^Z & & \\ & y_{11}^Z & \\ & & y_{22}^Z \end{bmatrix} \quad \frac{Y_{012}^S}{2} = \begin{bmatrix} y_{00}^S & & \\ & y_{11}^S & \\ & & y_{22}^S \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Di sisi lain, jika ada saluran transmisi tidak seimbang atau untransposed, matriks admitansi fasa juga akan penuh tapi simetris dalam satu sumbu diagonal. Oleh karena itu, matriks admitansi urutan akan penuh dan tidak simetris, sebagai berikut:

$$Y_{012}^Z = \begin{bmatrix} y_{00}^Z & y_{01}^Z & y_{02}^Z \\ y_{10}^Z & y_{11}^Z & y_{12}^Z \\ y_{20}^Z & y_{21}^Z & y_{22}^Z \end{bmatrix} \quad \frac{Y_{012}^S}{2} = \begin{bmatrix} Y_{00}^S & Y_{01}^S & Y_{02}^S \\ Y_{10}^S & Y_{11}^S & Y_{12}^S \\ Y_{20}^S & Y_{21}^S & Y_{22}^S \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Model *coupled sequence* jaringan ditandai dengan *mutual coupling* yang lemah, sehingga model jaringan couple pada Gambar 3.3 dapat dipisahkan menjadi tiga sirkuit urutan yang independen. Hal ini dapat dicapai dengan menghilangkan off-diagonal elemen dalam persamaan (3.10) dengan menggantinya dengan injeksi arus kompensasi pada kedua ujung jaringan tidak seimbang.

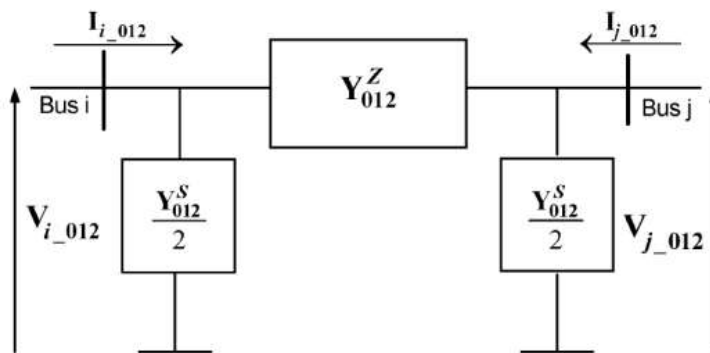
Injeksi arus pada saluran yang tidak seimbang (gambar 3.3) dihubungkan diantara busbar i dan busbar j untuk elemen off diagonal pada matrik admitansi shunt dan seri dapat dihitung sebagai berikut:

Arus injeksi off diagonal pada matrix admintansi seri:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_0^{ij} &= y_{01}^z (V_1^i - V_1^j) + y_{02}^z (V_2^i - V_2^j) \\ \Delta I_1^{ij} &= y_{10}^z (V_0^i - V_0^j) + y_{12}^z (V_2^i - V_2^j) \\ \Delta I_2^{ij} &= y_{20}^z (V_0^i - V_0^j) + y_{21}^z (V_1^i - V_1^j) \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Arus injeksi off diagonal pada matrix admintansi shunt:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_0^{ii} &= (y_{01}^s + y_{02}^s V_2^i) \\ \Delta I_1^{ii} &= (y_{10}^s + y_{12}^s V_2^i) \\ \Delta I_2^{ii} &= (y_{20}^s + y_{21}^s V_1^i) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$



Gambar 3.3 Model saluran coupled urutan

Urutan akhir arus injeksi pada busbar :

$$\text{Pada bus } i \quad \Delta I_{i_line_n} = \Delta I_n^{ii} + \Delta I_n^{ij}$$

$$\text{Pada bus } j \quad \Delta I_{j_line_n} = \Delta I_n^{jj} - \Delta I_n^{ij} \quad n=0 \text{ atau } 1 \text{ atau } 2 \quad (3.13)$$

Pada studi aliran daya seimbang, injeksi arus urutan positif dirubah untuk injeksi daya urutan positif, seperti berikut:

$$\begin{aligned} \Delta S_{i_line_1} &= V_1^j (\Delta I_{line_1}^i)^* \\ \Delta S_{j_line_1} &= V_1^j (\Delta I_{line_1}^j)^* \end{aligned} \quad (3.14)$$

Selanjutnya persamaan (3.10) dapat ditulis kembali seperti persamaan (3.9) untuk transposed line sebagai berikut:

$$Y_{012}^z = \begin{bmatrix} y_{00}^z & & \\ & y_{11}^z & \\ & & y_{22}^z \end{bmatrix} \quad Y_{012}^z = \begin{bmatrix} y_{00}^z & & \\ & y_{11}^z & \\ & & y_{22}^z \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Gambar 3.4 menunjukkan jaringan decoupled tiga urutan yang mewakili model saluran coupled pada Gambar 3.3. Mutual coupling disertakan oleh injeksi arus dan daya pada busbar. Persamaan (3.9) dan (3.15) digunakan untuk membangun matriks urutan terpisah, sedangkan pengaruh kopling diperhitungkan pada injeksi arus dan daya dalam (3.13) dan (3.14).

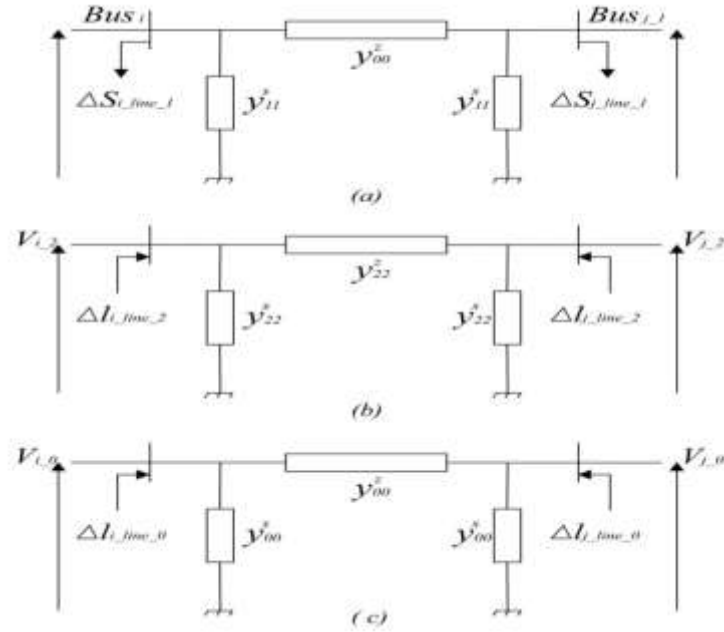
3.4.4 Metoda Aliran Daya Komponen Urutan.

Metoda aliran daya komponen urutan menggunakan spesifikasi aliran daya satu fasa itu termasuk tiga tipe.

Slack Busbar.

Pada slack busbar magnitude tegangan urutan positif dan sudut ditentukan.

$$V_1^{slack\ busbar} = V_1^{specified} \angle \theta_1^{specified} \quad (3.16)$$



Gambar 3.4 Model saluran decoupled urutan

Voltage Control Busbar (PV) .

PV busbar adalah generator bus yang mana magnitudo tegangan urutan positif dan total daya yang dibangkitkan ditentukan.

$$\left. \begin{aligned} V_1^{PV\ busbar} &= V_1^{specified} \\ P_1^{PV\ busbar} &= \frac{p^{total\ generation}}{3} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Load Busbar.

Untuk beban yang seimbang, daya masing-masing phase dihitung dari kebutuhan daya total pada busbar beban.

$$S_m^{specified} = \frac{(p^{total} + jQ^{total})}{3} \quad m = r \text{ atau } s \text{ atau } t \quad (3.18)$$

Disisi lain untuk daya yang tidak seimbang ditentukan secara individual untuk masing-masing phase.

$$S_m^{specified} = P^{specified} + jQ^{specified} \quad m = r \text{ atau } s \text{ atau } t \quad (3.19)$$

Daya tiga phase yang ditentukan pada persamaan (3.18) dan (3.19) digunakan untuk menghitung komponen arus injeksi fasa. Arus injeksi pada fasa m ($m = r$ atau s atau t) sebagai berikut :

$$I_m = \left(\frac{S_m^{specified}}{V_m} \right) \quad (3.20)$$

Injeksi arus pada pada urutan jaringan dihitung dengan mengubah komponen fasa arus injeksi pada persamaan (3.20) dalam komponen urutan:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Kemudian, spesifikasi beban urutan untuk tiga jaringan urutan tersebut dihitung dari urutan injeksi saat ini di (3.21). Dalam studi aliran daya yang seimbang , injeksi arus dari jaringan urutan positif dimodifikasi untuk injeksi daya

$$\left. \begin{aligned} I_{load_0}^{specified} &= I_0 \\ S_{load_1}^{specified} &= V_1(I_1)^* \\ I_{load_2}^{specified} &= I_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Spesifikasi total urutan dapat ditinjau dari persamaan (3.13), (3.14), dan (3.22). Persamaan (3.13) dan (3.14) menyajikan efek coupling saluran transmisi yan tidak ditransposisikan, sedangkan persamaan (3.22) menyajikan injeksi karena beban dalam jaringan. Oleh karena itu, spesifikasi urutan terakhir pada busbar dihitung sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} P_{i_1}^{specified} &= P_{i_load_1}^{specified} + \sum_{k=1, k \in i}^M \Delta P_{i_line_1}^k \\ Q_{i_1}^{specified} &= Q_{i_load_1}^{specified} + \sum_{k=1, k \in i}^M \Delta Q_{i_line_1}^k \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{i_2}^{specified} &= -I_{i_load_2}^{specified} - \sum_{k=1, k \in i}^M \Delta I_{i_line_2}^k \\ I_{i_0}^{specified} &= -I_{i_load_0}^{specified} - \sum_{k=1, k \in i}^M \Delta I_{i_line_0}^k \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

dimana M mengacu pada jumlah total saluran transmisi yang tidak ditranspos yang terhubung ke busbar, dan penjumlahan dari persamaan (3.23) dan (3.24) memberikan injeksi arus total dan daya pada busbar karena jalur transmisi yang tidak ditranspos.

A. Aliran daya urutan positif.

Persamaan (3.16), (3.17), dan (3.22) menyajikan spesifikasi aliran daya urutan positif yang sama dengan yang digunakan pada algoritma aliran daya single-phase. Persamaan (3.16) dan (3.17) menyajikan nilai-nilai generator yang konstan dan tidak perlu diperbarui selama proses solusi aliran daya. Nilai-nilai yang ditentukan dalam persamaan (3.22) tidak berarti hanya beban di jaringan yang sebenarnya, tetapi juga termasuk efek kopling. Ini berarti bahwa mungkin ada, pada busbar tertentu, tidak ada beban yang sebenarnya, tetapi ada beban yang ditentukan dalam jaringan urutan positif. Persamaan (3.22) perlu diperbarui dan disuplai ke rutinitas aliran daya fase tunggal untuk setiap iterasi dalam proses solusi secara keseluruhan. Perhitungan daya urutan positif untuk N busbar diberikan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} P_{i-1}^{calculated} &= \sum_{k=1}^N V_{i-1} V_{k-1} (G_{ik-1} \cos \theta_{ik-1} + B_{ik-1} \sin \theta_{ik-1}) \\ Q_{i-1}^{calculated} &= \sum_{k=1}^N V_{i-1} V_{k-1} (G_{ik-1} \sin \theta_{ik-1} + B_{ik-1} \cos \theta_{ik-1}) \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Ketidak sesuaian urutan positif pada busbar diberikan sebagai

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{i-1} &= P_{i-1}^{specified} - P_{i-1}^{calculated} \\ \Delta Q_{i-1} &= Q_{i-1}^{specified} - Q_{i-1}^{calculated} \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Untuk PV busbar, hanya ketidak sesuaian daya aktif urutan positif yang perlu dihitung pada (3.26) menggunakan daya yang ditentukan pada persamaan (3.17).

Metode aliran daya single fasa Newton-Raphson dan fast decoupled dipilih untuk memecahkan aliran daya urutan positif karena sudah mapan penggunaannya dalam industri. Metode lain, seperti metode injeksi arus, juga dapat digunakan dengan beberapa penyesuaian. Metode dasar Newton-Raphson dijelaskan dalam persamaan (3.27), sedangkan metode fast decoupled diberikan oleh

$$\begin{bmatrix} H_1 & N_1 \\ J_1 & L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\begin{cases} B_1' \Delta\theta_1 = \Delta P_1 \\ B_1'' \Delta V_1 = \Delta Q_1 \end{cases} \quad (3.28)$$

B. Persamaan tegangan urutan negatif dan urutan nol.

Tegangan urutan negatif dan urutan nol dihitung dengan menggunakan persamaan (3.29) dan (3.30), dengan menggunakan injeksi arus pada persamaan (3.24):

$$Y_2 V_2 = I_2^{specified} \quad (3.29)$$

$$Y_0 V_0 = I_0^{specified} \quad (3.30)$$

C. Penyelesaian Sparse Linear.

Dalam pelaksanaannya sparsity sistem tenaga dimanfaatkan dengan menggunakan SuperLU library. SuperLU adalah library untuk solusi langsung dari sistem yang besar, yang tersebar dan persamaan linear nonsymmetrical

D. Algoritma Aliran Daya Urutan.

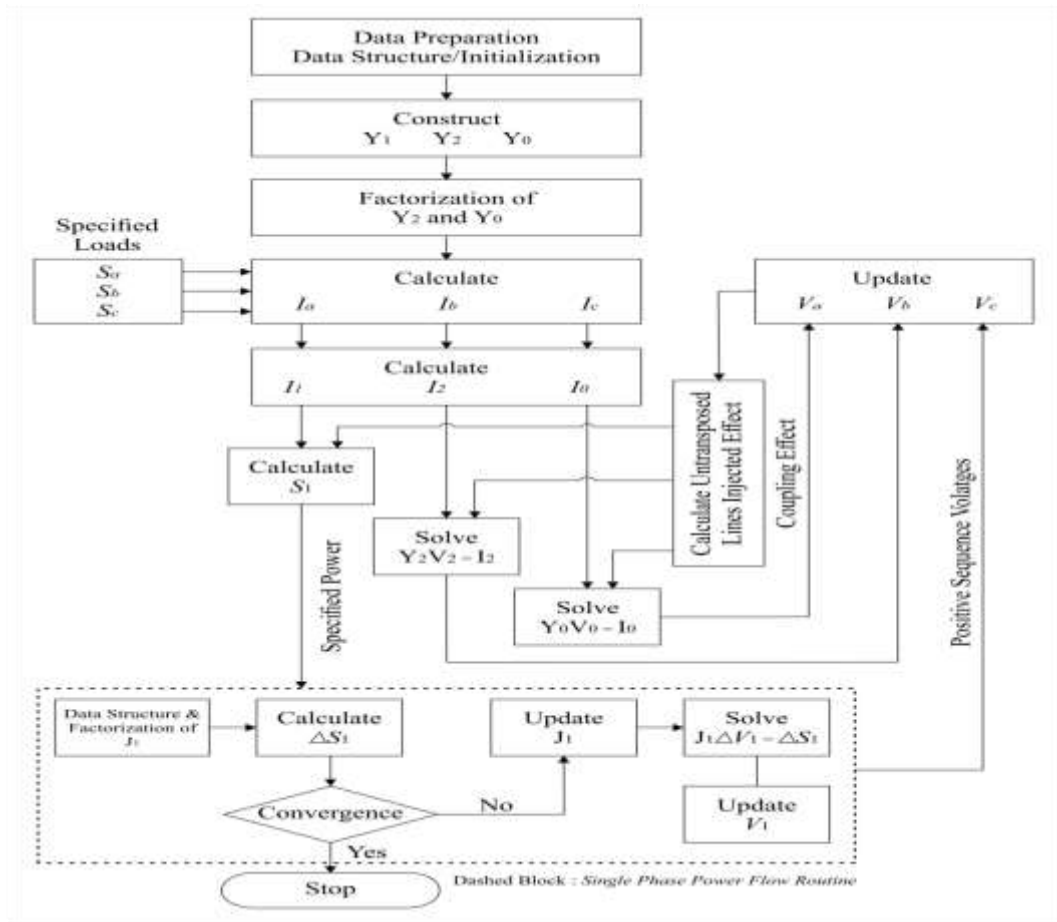
Gambar 3.5 menunjukkan algoritma solusi aliran daya urutan. Blok putus-putus menunjukkan Newton-Raphson fase tunggal daya aliran rutin, yang dipisahkan dari proses solusi secara keseluruhan. Algoritma Newton-Raphson dapat digantikan oleh algoritma fast decoupled atau oleh algoritma aliran daya fase tunggal lainnya. Solusi proses aliran daya urutan dimulai dengan:

1. Membuat matriks admitansi urutan sesuai dengan model sistem urutan daya .
2. Faktorisasi matriks admitansi urutan negatif dan urutan.
3. Menghitung daya dibangkitkan yang ditentukan untuk aliran daya urutan positif yang ditetapkan dan tidak perlu diperbarui dalam proses solusi.
4. Menghitung komponen arus fasa yang diinjeksikan akibat beban yang ditentukan berdasarkan seting awal tegangan tiga fasa menggunakan persamaan (3.20) (pada tahap awal tegangan tiga fasa yang digunakan

pada iterasi pertama diinjeksikan, dalam iterasi berikutnya tegangan tiga fasa yang diupdate yang digunakan).

5. Mengubah komponen arus fasa yang diinjeksikan pada setiap busbar dalam komponen urutan menggunakan persamaan (3.21)
6. Menggabungkan komponen urutan daya dan arus yang diinjeksikan dari beban dan saluran untransposed yang ditentukan untuk menghitung urutan terakhir nilai yang ditetapkan menggunakan persamaan (3.23) dan (3.24).
7. Menyelesaikan (3.29) dan (3.30) dengan menggunakan arus urutan negatif dan nol yang ditentukan untuk menghitung tegangan urutan negatif dan urutan nol. Urutan daya positif yang ditentukan pada persamaan (3.23) disalurkan aliran daya fasa tunggal untuk menghitung tegangan urutan positif.
8. Hitung tegangan tiga fasa yang baru.
9. Lanjutkan ke langkah/step 4

Proses ini diulangi sampai toleransi yang ditetapkan tercapai. Dalam Gambar 3.5, konvergensi diukur menggunakan urutan kriteria ketidakcocokan daya positif.



Gambar 3.5 Diagram alir aliran daya Newton Raphson metoda urutan positif, negatif dan nol.

3.5 Formulasi Unit Commitment.

Secara umum fungsi tujuan dari masalah UC adalah meminimalkan biaya pembangkitan selama periode tertentu, yaitu biaya bahan bakar dan biaya start up pembangkit (*start up cost*). Formulasi UC untuk pembangkit untuk pembangkit thermal :

$$\min F_H = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N [F_{ih}(P_{ih}) + ST_{ih}(1 - u_{i(h-1)})] u_{ih} \quad (3.31)$$

dimana :

$$F_{ih}(P_{ih}) = c_i(P_{ih})^2 + b_i(P_{ih}) + a_i \quad (3.32)$$

$$ST_{ih} = \begin{cases} HSC_i, & \text{jika } MDT_i \leq T_i^{off} \leq MDT_i + CSH_i \\ CSC_i & \text{jika } T_i^{off} > MDT_i + CSH_i \end{cases} \quad (3.33)$$

Batasan:

1. Total daya yang dibangkitkan sama dengan total beban

$$\sum_{i=1}^N P_{ih} U_{ih} = D_h$$

2. Cadangan daya berputar (Spining Reserve)

$$\sum_{i=1}^N P_{ih} u_{ih} \geq D_h + R_h$$

3. Unit output constrain

$$P_{i(min)} \leq P_{ih} \leq P_{i(max)}$$

4. Unit max ramp up/down rate:

$$-MRU_i \leq P_{t,i} - P_{t+1,i} \leq MRD_i$$

5. Minimum up time limit

$$T_i^{on} \geq MUT_i$$

6. Minimum down time limit

$$T_i^{off} \geq MDT_i$$

Penempatan DG pada saluran distribusi akan sangat mempengaruhi perhitungan pembebanan pada setiap pembangkit yang ada sehingga biaya pembangkitan terdiri dari tiga bagian yaitu : biaya dari daya yang dibangkitkan oleh DG *non renewable* dan biaya pembangkitan DG *renewable* dan biaya daya yang dialirkan dari grid pada sistem distribusi (*slack bus*). Sehingga persamaan biaya total pembangkitan akan menjadi:

$$F_{Tot} = \sum_{h=1}^H F_{ih}(P_{ih}) + \sum_{k=1}^K F_{kh}(P_{kh}) + F_{Gh}(P_{Gh}) \quad (3.34)$$

dimana:

F_{Tot} : biaya total pembangkitan.

$\sum_{i=1}^N F_{ih}(P_{ih})$: biaya bahan bakar DG *non renewable* pada jam h

$\sum_{k=1}^K F_{kh}(P_{kh})$: biaya bahan bakar DG *renewable*

$F_{Gh}(P_{Gh})$: biaya bahan bakar dari termal (grid utama)

Persamaan umum biaya bahan bakar DG non renewable:

$$F_{ih}(P_{ih}) = c_i(P_{ih})^2 + b_i(P_{ih}) + a_i \quad (3.35)$$

dimana:

$F_{ih}(P_{ih})$: biaya bahan bakar dari DG non renewable

c_i, b_i, a_i : koefisien bahan bakar dari DG non renewable

P_{ih} : daya yang dibangkitkan DG i (MW)

Persamaan umum biaya bahan bakar DG renewable:

$$F_{kh}(P_{kh}) = c_k(P_{kh})^2 + b_k(P_{kh}) + a_k \quad (3.36)$$

dimana :

$F_{kh}(P_{kh})$: biaya bahan bakar dari DG (\$/h)

c_k, b_k, a_k : koefisien bahan bakar dari DG

P_{kh} : daya yang dibangkitkan DG k (MW)

Persamaan umum biaya bahan bakar dari termal (grid utama):

$$F_{Gh}(P_{Gh}) = c_G(P_{Gh})^2 + b_G(P_{Gh}) + a_G \quad (3.37)$$

dimana:

$F_{Gh}(P_{Gh})$: biaya daya dari Grid utama (\$/h)

c_G, b_G, a_G : koefisien daya dari Grid/termal

P_{Gh} : daya yang dialirkan dari Grid (MW)

Keseimbangan daya dengan menambahkan DG dan baterai menjadi :

$$\sum_{i \in N} P_{ih} + \sum_{k \in G} P_{kh} + \sum_{j \in P} P_{Bh} + P_{Gh} = P_{Dh} + P_{lossh} \quad (3.38)$$

di mana:

$\sum_{i \in N} P_{ih}$: total daya yang dibangkitkan DG non renewable (MW).

$\sum_{k \in G} P_{kh}$: total daya dari DG renewable (MW).

$\sum_{j \in P} P_{Bjh}$: daya dari baterai (MW).

P_{Gh} : daya dari grid utama (MW).

P_{Dh} : total beban (MW).

P_{lossh} : rugi-rugi saluran (MW).

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA

Pada bab ini dibahas langkah–langkah untuk menyelesaikan masalah penjadwalan dan pembebanan pada Grid utama dan DGnon renewable (turbin mikro) dengan memperhatikan rugi-rugi daya pada sistem distribusi yang tidak seimbang menggunakan metode quantum evolutionary.

Adapun tahap-tahap simulasi yang dilakukan untuk UC DG dan daya dari grid utama pada sistem distribusi adalah sebagai berikut:

1. Baca file data berisi parameter konfigurasi
 - Parameter jaringan (data bus, data saluran)
 - Data beban (MW, MVA) setiap jam selama 24 jam
 - Data daya PV ,WT dan baterai (dalam MW) setiap jam selama 24 jam.
 - Data parameter iterasi QEA dan Power Flow (jumlah qubit untuk setiap parameter, jumlah individu, jumlah iterasi QEA dan Power Flow dan error).
2. Inisialisasi populasi. Untuk setiap individu di siapkan untuk iterasi ke 0

$$Q(0) = \{q_1(0), q_2(0), \dots, q_n(0)\}$$

Setiap *individu* terdiri dari $k=24 \times 3 \times 2 \times 8$ *qubit*. Angka 8 menunjukkan jumlah qubit untuk setiap parameter, angka 3 menunjukkan jumlah fasa, angka 2 menunjukkan banyaknya DG yang dijadwal dan didispatch pembebanannya dan angka 24 menunjukkan pembebanan selama 24 jam.

$$q_1(0) = \left[\begin{array}{c} |\alpha_1(0)| \quad |\alpha_2(0)| \quad \dots \quad |\alpha_k(0)| \\ |\beta_1(0)| \quad |\beta_2(0)| \quad \dots \quad |\beta_k(0)| \end{array} \right]$$

3. Untuk insialisasi setiap qubit diset $\alpha_i = \frac{1}{\sqrt{2}}$ dan $\beta_i = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$q_1(0) = \left[\begin{array}{ccc} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots \end{array} \right]$$

Inisialisai setiap qubit pada nilai $\alpha_i = \frac{1}{\sqrt{2}}$ dan $\beta_i = \frac{1}{\sqrt{2}}$ untuk mendapatkan probabilitas yang sama pada setiap *state*.

4. Berdasarkan qubit-qubit hitung daya generator-generator pada jaringan (lihat cara menentukan DG on/off dan transformasi qubits ke mw).
5. Rangkai matrik data bus. Evaluasi setiap $p_i(0)$ ($i = 1, 2, \dots, n$).
6. Gunakan data bus, data saluran dan beban, running program power flow 3 fasa. Dari hasil running power flow ini akan didapat daya yang dialirkan dari grid utama (*slack bus*) dan rugi daya pada saluran. Sehingga batasan persamaan daya $\sum_{i \in N} P_{ih} + \sum_{k \in G} P_{kh} + \sum_{j \in P} P_{Bh} + P_{Gh} = P_{Dh} + P_{lossh}$ (seperti persamaan 3.38) dapat terpenuhi.
7. Ulangi proses diatas untuk setiap perubahan beban (24 jam) dan catat hasil perhitungan power flow setiap jam nya dalam sebuah matrik history.
8. Inputkan matrik history ke *objective function* dan lakukan perhitungan *objective function* untuk menghasilkan fitness dari individu ini.
9. Lakukan semua langkah diatas untuk setiap individu didalam populasi. Sehingga tiap individu mempunyai nilai fitness.
10. Cari individu dengan fitness terkecil. Individu ini adalah individu terbaik untuk iterasi saat ini.
11. Berdasarkan individu terbaik ini, rangkai matrik rotasi untuk mempolarisasi qubit-qubit individu-individu lain guna mempersiapkan populasi baru yg lebih unggul untuk iterasi berikutnya (lihat cara mempolarisasi qubit).
12. Ulangi langkah diatas untuk iterasi selanjutnya sampai individu terbaiknya tidak berubah (iterasi yang terakhir).

Cara menentukan DG on/off dan transformasi qubits ke MW.

Buat secara acak solusi biner $P(0)$ dengan observasi dari $Q(0)$:

$$P(0) = \begin{Bmatrix} pr_1(0), pr_2(0), \dots, pr_m(0), \\ ps_1(0), ps_2(0), \dots, ps_m(0), \\ pt_1(0), pt_2(0), \dots, pt_m(0) \end{Bmatrix}$$

pr , ps dan pt untuk fasa R , S and T . m adalah banyaknya DG yang dipasang.

Pada simulasi ini, setiap DG non renewable yang diatur pembebanannya dipresentasikan dengan 8 qubit (8 bilangan biner). Bilangan biner yang pertama menunjukkan status DG (*on* atau *off*). Jika bilangan binernya 0, menunjukkan DG *off* dan sebaliknya jika bilangan binernya 1 menunjukkan DG *on*. Daya yang dibangkitkan oleh DG dipresentasikan oleh 7 bilangan biner yang berikutnya, berdasarkan batasan kapasitas DG (P_{min} dan P_{max}).

Hanya bilangan biner yang pertama fasa R yang diperhatikan dan bilangan biner ini mengendalikan semua DGs secara seragam, masing-masing untuk fasa S dan T pada bus itu.

Daya nyata DG suatu fasa, masing-masing akan ditentukan secara proporsional dengan P yang sesuai dikisaran $[P_{min}-P_{max}]$ seperti yang ditentukan dalam matrik data bus.

Cara mempolarisasi Qubit untuk membangkitkan qubit yang baru.

Bangkitkan populasi berikutnya dari populasi saat ini dengan memutar setiap anggota populasi, sehingga setiap anggota populasi (individu) mendekat kearah individu yang paling baik. Rotasi dilakukan dengan *rotator matrik* (*rotation gate*) seperti persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} \alpha_j(t+1) \\ \beta_j(t+1) \end{bmatrix} = R_i(t) \times \begin{bmatrix} \alpha_j(t) \\ \beta_j(t) \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots)$$

$$R_i(t) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_i & -\sin \Delta\theta_i \\ \sin \Delta\theta_i & \cos \Delta\theta_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\Delta\theta_i = \Delta f_i \times \text{sign}(\alpha_b - \alpha_j) \times \text{sign}[\beta_j \times \sin \Delta f_i - \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i)]$$

dimana :

$$\Delta f_i = \pi \times \left(1 - \frac{f(b)}{f(p_i(t))}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$f(b)$ = nilai fitness individu terbaik

$f(p_i(t))$ = nilai fitness setiap individu

$$\text{sign}(\alpha_b - \alpha_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } \alpha_b \geq \alpha_j \\ -1 & \text{if } \alpha_b < \alpha_j \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \text{sign} [\beta_j \times \sin \Delta f_i - \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i)] \\ &= \begin{cases} +1 & \text{if } \beta_j \times \sin \Delta f_i \geq \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i) \\ -1 & \text{if } \beta_j \times \sin \Delta f_i < \alpha_j \times (1 - \cos \Delta f_i) \end{cases} \end{aligned}$$

Hitung fungsi tujuannya (*objective function*) dan simpan nilai fitnessnya. Fungsi tujuan adalah mencari biaya pembangkitan yang termurah selama 24 jam. Biaya pembangkitan selama 24 jam adalah biaya bahan bakar dan biaya *start up* pembangkit dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \min F_H = & \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^N [F_{iph}(P_{iph}) + ST_{iph}(1 - u_{ip(h-1)})] u_{iph} + \\ & F_{kph}(P_{kph}) + F_{Gph}(P_{Gph}) \end{aligned}$$

dimana :

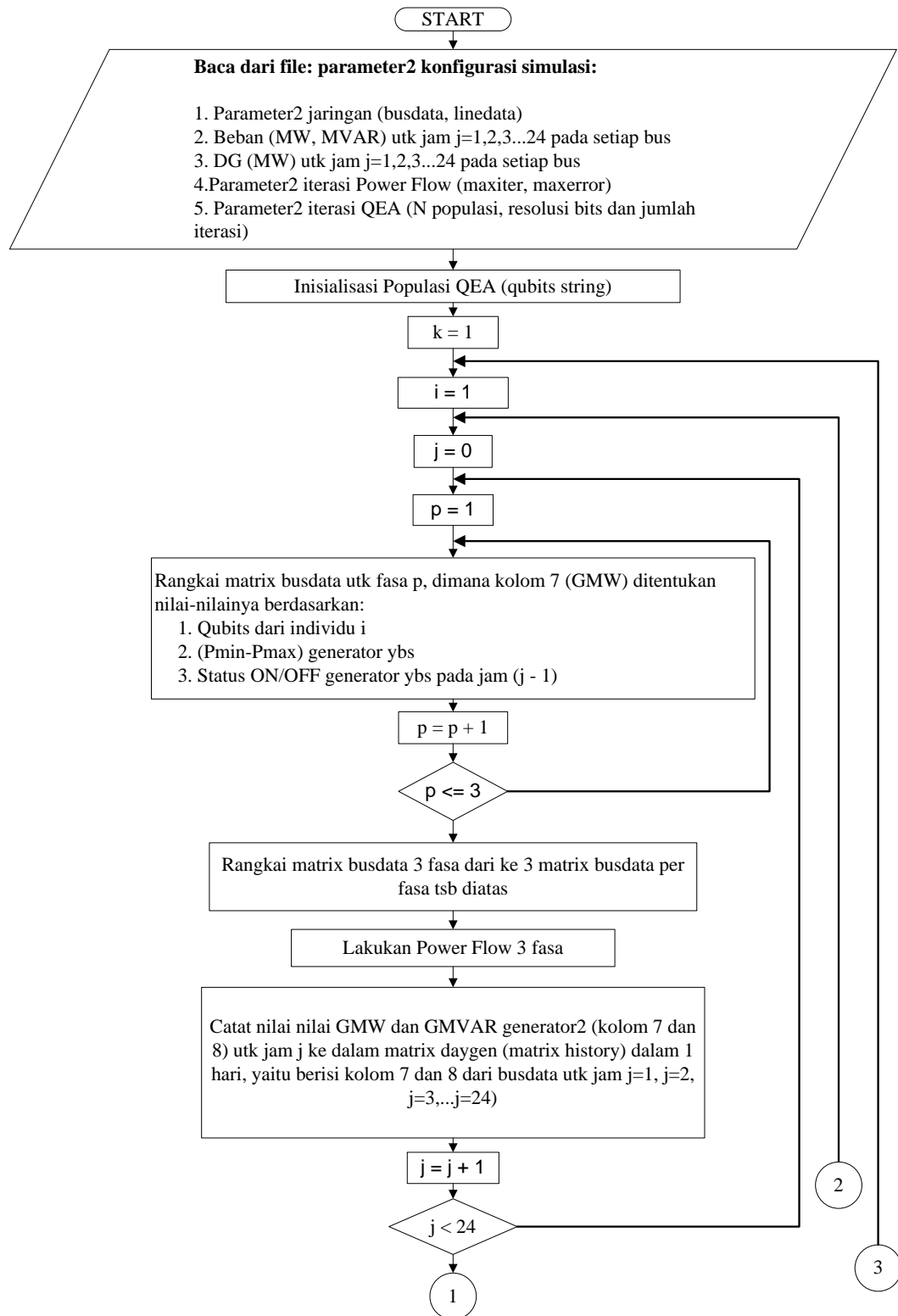
$$F_{iph}(P_{iph}) = c_i(P_{iph})^2 + b_i(P_{iph}) + a_i$$

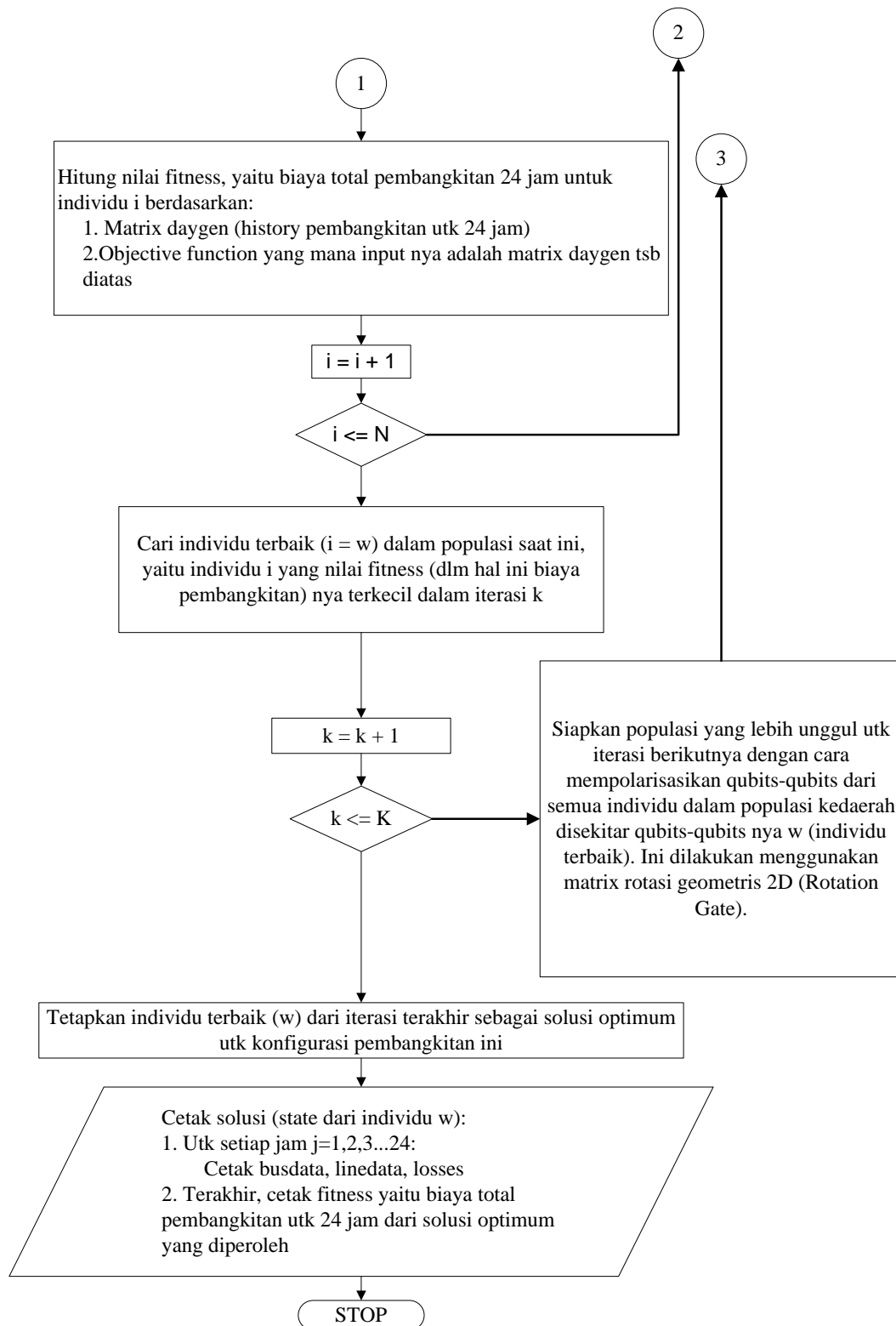
$$ST_{iph} = \begin{cases} HSC_i, & \text{jika } MDT_i \leq T_i^{off} \leq MDT_i + CSH_i \\ CSC_i & \text{jika } T_i^{off} > MDT_i + CSH_i \end{cases}$$

$$F_{kph}(P_{kph}) = c_k(P_{kph})^2 + b_k(P_{kph}) + a_k$$

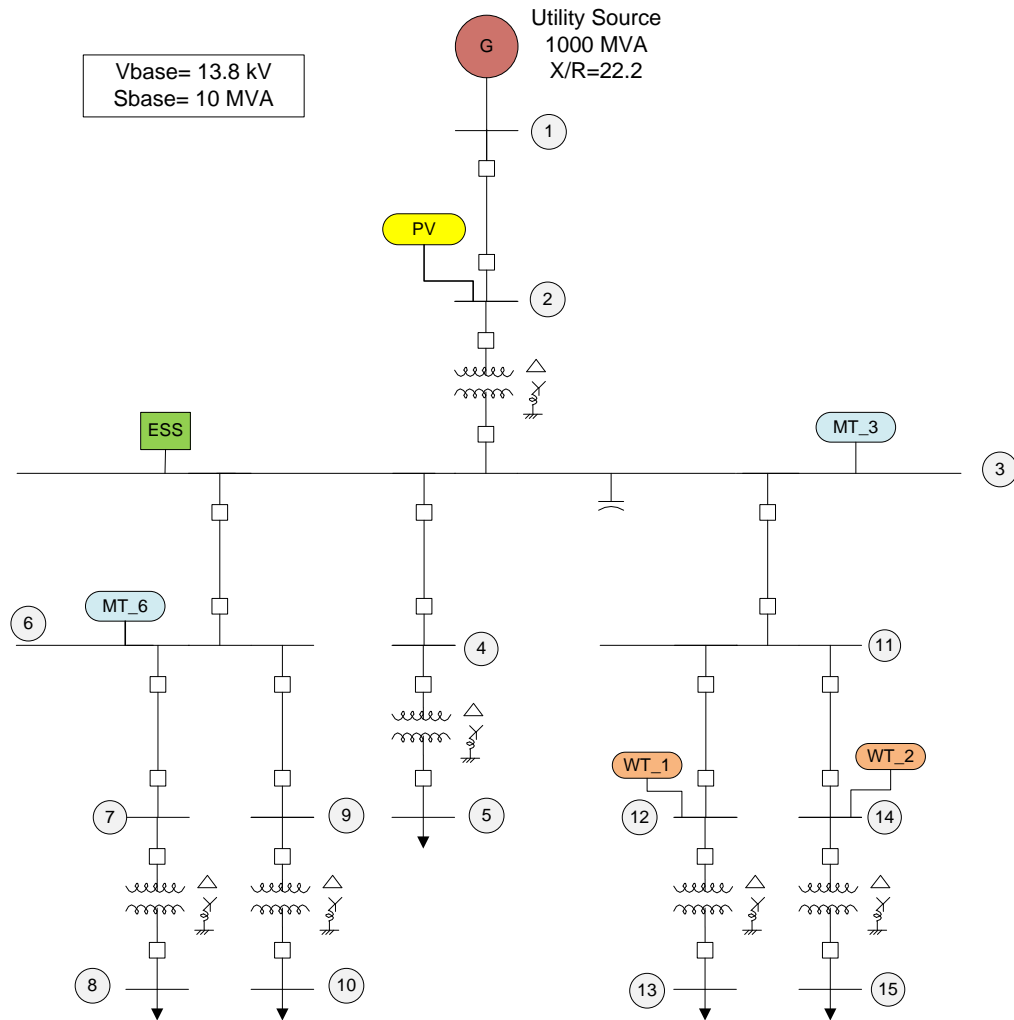
$$F_{Gph}(P_{Gh}) = c_G(P_{Gph})^2 + b_G(P_{Gph}) + a_G$$

Langkah-langkah simulasi diatas digambarkan dalam diagram alir (*flow chart*) gambar 4.1.





Gambar 4.1 Diagram alir penjadwalan dan pembebanan DG.



Gambar 4.2 Single line diagram sistem distribusi radial

Simulasi dilakukan dengan menggunakan single line diagram IEEE 15 bus seperti gambar 4.2 yang dimodifikasi menjadi sistem yang tidak seimbang. Penempatan DG pada bus-bus saluran distribusi, untuk dapat menunjukkan hasil simulasi sudah sesuai dengan batasan-batasan dalam perhitungan unit commitment. Penjadwalan dan pembebanan yang optimum (dispatch) dilakukan pada DG non renewable (micro turbine/MT) pada bus 3 dan bus 6. DG renewable (PV dan WT) dibebani sesuai dengan daya yang dibangkitkan setiap jamnya. Baterai pada simulasi diperlakukan sebagai beban. Pada saat baterai di *charge*, baterai sebagai beban positif (+1MW) dan pada saat baterai di *discharge*, baterai sebagai beban negatif (-1MW).

4.1 Data Pembangkit , Saluran, Beban, Parameter QEA dan Power Flow.

Adapun data-data pembangkit, saluran dan beban adalah sebagai berikut. Tabel 4.1, adalah data bus pada kondisi awal. Tipe bus 0, 1 dan 2 menunjukkan bahwa bus tersebut adalah bus beban, slack bus dan bus generator.

Dalam studi aliran daya , bus terdiri dari 3 jenis dan diklasifikasikan sebagai:

Bus beban atau PQ bus, daya nyata $|P|$ dan daya reaktif $|Q|$ ditentukan. Hal ini juga dikenal sebagai Load Bus. Daya akan mengalir keluar dari bus atau mengalir ke beban. Bus beban akan digunakan untuk menemukan voltase dan sudut bus.

Bus generator atau bus PV, daya nyata $|P|$ dan besarnya tegangan $|V|$ ditentukan. Bus ini memiliki pembangkit listrik konstan, dikendalikan melalui penggerak utama, dan tegangan bus konstan.

Slack bus atau swing bus, untuk menyeimbangkan daya aktif dan daya reaktif pada sistem. Hal ini juga dikenal sebagai bus referensi atau bus swing. Bus kendur akan berfungsi sebagai referensi sudut untuk semua bus lain dalam sistem, yang diatur ke 0° . Besarnya tegangan pada slack bus diasumsikan 1 p.u. dan sudut tegangan 0° . Slack bus mengalirkan daya aktif dan daya reaktif pada sistem.

Pada tabel 4.1 bus 1 digunakan sebagai slack bus. Daya dari bus 1 adalah keluaran dari trafo distribusi. Bus 2, 12 dan 14 adalah bus generator. Panel surya sebagai sumber tenaga listrik dipasang pada bus 2 dan turbin angin dipasang pada bus 12 dan 14. Baterai dipasang pada bus 3.

Tabel 4.2 adalah data saluran pada fasa R, S dan T. Pada simulasi ini dianggap bahwa saluran pada fasa R, S dan T mempunyai resistansi (**R**) dan reaktansi (**X**) yang sama. Ketidak seimbangan sistem diakibatkan oleh ketidak seimbangan pemakaian daya pada sisi beban.

Tabel 4.3 adalah batas operasi dari pembangkit (DG yang *dispatchable*). Pada simulasi ini DG yang *dispatchable* adalah turbin mikro yang berada pada bus 3 (MT_3) dan turbin mikro yang berada pada bus 6 (MT_6). Sedangkan Untuk panel surya dan turbin angin, pembangkit yang daya keluarannya tidak dapat diatur, sehingga dalam simulasi ini kapasitasnya ditentukan untuk setiap jamnya.

Tabel 4.1 Data bus sistem distribusi.

Bus	Tipe Bus	V (pu)	$\theta_V(\text{rad})$
1	1	1	0
2	2	1	0
3	0	1	0
4	0	1	0
5	0	1	3.5
6	0	1	0
7	0	1	0
8	0	1	0.9
9	0	1	0
10	0	1	0.27
11	0	1	0
12	2	1	0
13	0	1	1.5
14	2	1	0
15	0	1	0.1

Tabel 4.2 Data saluran distribusi (fasa R,S,T)

Bus	Bus	R (ohm)	X(ohm)
1	2	0.00151	0.00296
2	3	0.004447	0.03553
3	4	0.03564	0.02611
4	5	0.06510	0.39467
3	6	0.06065	0.10150
6	7	0.00423	0.00154
7	8	0.43200	2.55330
6	9	0.02560	0.00332
9	10	0.44800	3.84000
3	11	0.03976	0.05127
11	12	0.00732	0.00095
12	13	0.13160	0.09200
11	14	0.00104	0.00135
14	15	0.82100	5.75000

Table 4.3 Batas operasi dari pembangkit.

No	Tipe	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	MRU (MW)	MRD (MW)	MUT (jam)	MDT (jam)	ST (\\$)
1	MT_3	1	5	3	3	2	2	3
2	MT_6	1	5	3	3	2	2	3
3	PV	-	-	-	-	-	-	-
3	WT_1	-	-	-	-	-	-	-
4	WT_2	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.4 Koefisien biaya dari pembangkit.

Tipe	c	b	a
MT_3	0.001	0.030	0
MT_6	0.001	0.030	0
Grid	0.02	0.500	0
PV	0	0.001	0
WT_1	0	0.001	0
WT_2	0	0.001	0

Daya yang dibangkitkan turbin mikro harus memenuhi batasan daya minimum dan maksimum (P_{min} dan P_{max}), batasan *maximum ramp rate* (*maximum ramp up*/MRU dan *maximum ramp down*/MRD) batasan waktu untuk *on* atau *off* (*minimum up time*/MUT dan *minimum down time*/MDT) dan biaya start (*start up cost* / ST).

Tabel 4.4 menunjukkan koefisien biaya untuk DG non renewable dan daya yang dialirkan dari slack bus. Untuk daya yang dibangkitkan dari pembangkit energi terbarukan (PV, WT_1 dan WT_2) fungsi biayanya merupakan persamaan polinomial orde 1 (satu). Pembangkit ini tidak memerlukan bahan bakar. Fungsi biaya dimisalkan hanya dari biaya operasional pembangkit. Sedangkan untuk fungsi biaya dari DG *non renewable* (MT) dan daya dari keluaran trafo distribusi (grid utama) merupakan persamaan polinomial orde 2 (dua). Pada kedua jenis pembangkit listrik ini memerlukan bahan bakar untuk membangkitkan daya. Dengan melihat koefisien dari fungsi biaya seluruh pembangkit yang digunakan dalam simulasi ini, biaya pembangkitan yang paling mahal MW/ jam nya adalah daya yang dialirkan dari slack bus (grid utama).

Tabel 4.5 Data beban (MW) pada bus selama 24 jam.

Jam	L3 (MW)			L5 (MW)			L8(MW)			L10 (MW)			L13 (MW)			L15 (MW)		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1	1	1	1	8.5	8.2	8.2	1.9	1.9	1.9	1	0.9	0.9	3.5	3.5	3.5	0.3	0.3	0.3
2	1	1	1	9.2	8.9	8.9	1.9	1.9	1.9	0.7	0.9	0.9	4.8	4.8	4.8	0.3	0.3	0.3
3	1	1	1	6.5	6.2	6.2	3	3	3	0.9	0.9	0.9	3.9	3.9	3.9	0.3	0.3	0.3
4	1	1	1	5.9	5.6	5.6	3.1	3.1	3.1	0.9	0.9	0.9	3.1	3.1	3.1	0.3	0.3	0.3
5	1	1	1	7	6.7	6.7	3.1	3.1	3.1	0.9	0.9	0.9	3.2	3.2	3.2	0.3	0.3	0.3
6	1	1	1	6.5	6.2	6.2	3.2	3.2	3.2	1	1	1	3.5	3.5	3.5	0.4	0.4	0.4
7	1	1	1	9.5	9.2	9.2	1.9	1.9	1.9	1	1	1	3.6	3.6	3.6	0.4	0.4	0.4
8	-1	-1	-1	10.5	10	10.2	3.6	3.6	3.6	1.1	1.1	1.1	3.5	3.5	3.5	0.4	0.4	0.4
9	-1	-1	-1	13	13	12.7	3.9	3.9	3.9	1.2	1.2	1.1	5.4	5.4	5.4	0.4	0.4	0.4
10	-1	-1	-1	15.1	15	14.8	3.9	3.9	3.9	1.2	1.2	1.2	6.5	6.5	6.5	0.4	0.4	0.4
11	-1	-1	-1	14.2	14	13.9	4.4	4.4	4.4	1.3	1.3	1.3	7.4	7.4	7.4	0.5	0.5	0.5
12	-1	-1	-1	15.5	15	15.2	4	4	4	1.2	1.2	1.2	6.7	6.7	6.7	0.4	0.4	0.4
13	-1	-1	-1	15	15	14.7	3.9	3.9	3.9	1.2	1.2	1.1	6.4	6.4	6.4	0.4	0.4	0.4
14	-1	-1	-1	13.7	13	13.4	3.5	3.5	3.5	2.3	2.5	2.3	6.2	6.2	6.2	1.1	1.1	1.1
15	-1	-1	-1	14	14	13.7	3.6	3.6	3.6	1	1.1	1.2	6	6	6	0.6	0.6	0.6
16	-1	-1	-1	14.7	14	14.4	3.8	3.8	3.8	1.1	1.1	1.2	5.3	5.3	5.3	0.4	0.4	0.4
17	-1	-1	-1	14.2	14	13.9	4.2	4.2	4.2	1.3	1.3	1.3	5	5	5	0.5	0.5	0.5
18	-1	-1	-1	12	12	11.7	4.9	4.9	4.9	1.5	1.5	1.3	4.1	4.1	4.1	0.5	0.5	0.5
19	-1	-1	-1	8.8	8.5	8.5	3.2	3.2	3.2	1.6	1.6	1.3	6	6	6	0.6	0.6	0.6
20	1	1	1	6.6	6.3	6.3	2.1	2.1	2.1	1.5	1.5	1.3	8.3	8.3	8.3	0.6	0.6	0.6
21	1	1	1	4.5	4.2	4.2	4.5	4.5	4.5	1.4	1.4	1.3	5.5	5.5	5.5	0.5	0.5	0.5
22	1	1	1	5	4.7	4.7	3.9	3.9	3.9	1.2	1.2	1.2	5.5	5.5	5.5	0.5	0.5	0.5
23	1	1	1	5.1	4.8	4.8	3.6	3.6	3.6	1.2	1.1	1	5.5	5.5	5.5	0.4	0.4	0.4
24	1	1	1	4.5	4.2	4.2	1.9	1.9	1.9	0.8	0.9	1	3	3	3	0.3	0.3	0.3

Tabel 4.5 menunjukkan data beban setiap fasa (R, S dan T) selama 24 jam. Beban terletak pada bus 3, 5, 8, 10 , 13 dan 15. Baterai berada pada bus 3. Pada bus 5 dan bus 10, beban tidak seimbang pada fasa R, S dan T. Dilihat dari karakteristik beban dimana beban puncak berada pada siang hari, ini menunjukkan bahwa pada sistem distribusi ini ada beban industri.

Pada tabel 4.6 menunjukkan total beban fasa R, S dan T untuk setiap jamnya. Setiap jam beban selalu berubah dan tidak seimbang. Daya yang dibangkitkan PV dan WT besarnya tergantung dari lingkungan sekitarnya, yaitu besarnya intensitas cahaya matahari untuk untuk PV dan kecepatan angin untuk WT. Pada simulasi ini PV dan WT adalah pembangkit satu fasa yang

dihubungkan ke masing-masing fasa sistem dan daya yang dibangkitkan oleh PV, WT_1 dan WT_2 ditentukan kapasitasnya seperti pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Beban dan daya DG energi terbarukan.

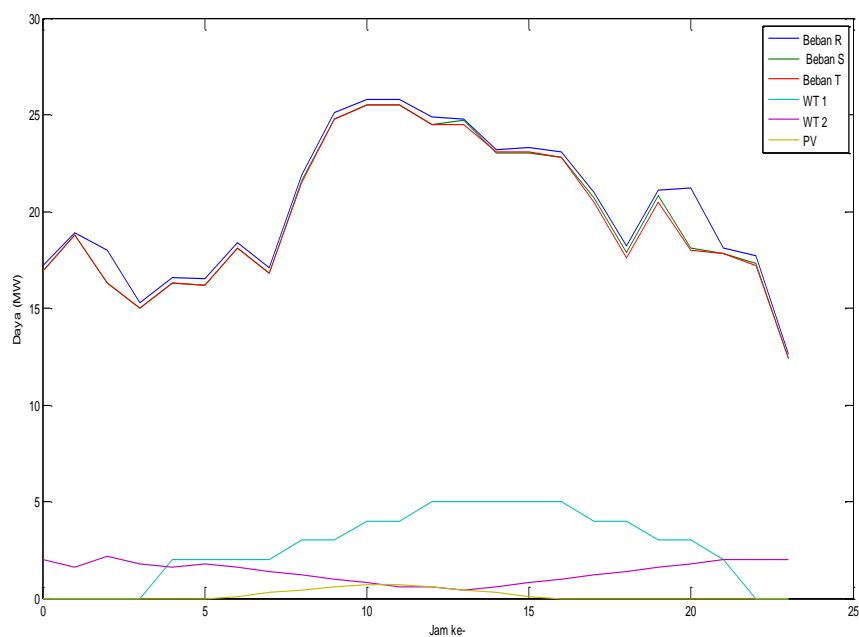
Jam	Fasa R (MW)	Fasa S (MW)	Fasa T (MW)	WT_1 R,S,T (MW)	WT_2 R,S,T (MW)	PV R,S,T (MW)
1	15.2	14.9	14.9	0	2	0
2	16.9	16.6	16.6	0	1.6	0
3	16.1	15.8	15.8	0	2.2	0
4	13.3	13	13	0	1.8	0
5	14.6	14.3	14.3	2	1.6	0
6	14.5	14.2	14.2	2	1.8	0
7	16.4	16.1	16.1	2	1.6	0.1
8	19.1	18.8	18.8	2	1.4	0.3
9	23.9	23.6	23.6	3	1.2	0.4
10	27.1	26.8	26.8	3	1	0.6
11	27.8	27.5	27.5	4	0.8	0.7
12	27.8	27.5	27.5	4	0.6	0.7
13	26.9	26.6	26.6	5	0.6	0.6
14	26.8	26.5	26.5	5	0.4	0.4
15	25.2	24.9	24.9	5	0.6	0.3
16	25.3	25	25	5	0.8	0.1
17	25.1	24.8	24.8	5	1	0
18	23	22.7	22.7	4	1.2	0
19	20.2	19.9	19.9	4	1.4	0
20	19.1	18.8	18.8	3	1.6	0
21	19	18.7	18.7	3	1.8	0
22	16.1	15.8	15.8	2	2	0
23	15.7	15.4	15.4	0	2	0
24	10.6	10.3	10.3	0	2	0

Tabel 4.7 menunjukkan data parameter dari metoda quantum evolutionary dan Power Flow.

Pada gambar 4.3 menunjukkan perubahan beban selama 24 pada setiap fasa (R, S dan T) dan daya yang dibangkitkan oleh DG yang terbarukan (panel surya dan turbin angin).

Tabel 4.7 Data parameter QEA dan Power Flow

Parameter	Jumlah
Jumlah qubit perparameter	8
Besar populasi (jumlah individu)	100
Jumlah iterasi QEA	15
Jumlah iterasi maksimal- Power Flow	
Flow	15000
Maksimal error Power Flow	10^{-2}



Gambar 4.3 Grafik beban fasa dan DG energi terbarukan.

4.2 Hasil Simulasi dan Analisa.

Untuk melihat kondisi awal dari sistem sebelum DG dipasang, dilakukan *running power flow* sehingga diketahui tegangan pada setiap bus, rugi-rugi daya pada saluran dan total daya yang harus disuplai grid utama (*slack bus*). Total beban pada fasa R sebesar 485.7 MW, pada fasa S sebesar 478.5 MW dan pada fasa T sebesar 478.5 MW. Total beban selama 24 jam 1442.7 MW.

Tabel 4.8 Profile tegangan bus (p.u) fasa R tanpa DG.

Jam	Tegangan pada bus (p.u) Fasa R														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	0.996	0.974	1	1	0.99	1	0.983	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.995	0.973	0.998	0.997	0.988	0.997	0.974	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.996	0.977	0.996	0.996	0.98	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	1	0.996	0.976	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.979	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	1	0.996	0.973	0.998	0.998	0.988	0.997	0.976	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.994	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1.001	0.994	0.968	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	1	0.993	0.965	0.995	0.995	0.972	0.995	0.969	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	1	0.993	0.966	0.996	0.996	0.973	0.995	0.977	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.967	0.996	0.996	0.976	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.966	0.996	0.996	0.974	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	0.996	0.996	0.971	0.995	0.977	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	0.995	0.995	0.964	0.995	0.974	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1.001	0.996	0.975	1	1	0.982	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.986	0.997	0.976	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.978	0.996	0.996	0.976	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.997	0.997	0.988	0.997	0.973	1	1	0.994	1	0.973

Hasil running power flow, tabel 4.8, tabel 4.9, tabel 4.10 menunjukkan profile tegangan setiap bus fasa R, S dan T selama 24 jam. Tegangan setiap busnya berada antara $0.95 \leq V \leq 1.1 \text{ pu}$, yaitu tegangan yg diijinkan sesuai dengan standar IEEE. Tegangan yang paling rendah sebesar 0.964 p.u pada bus 10 pada jam ke 3. Bus 10 adalah bus beban.

Tabel 4.9 Profile tegangan bus (p.u) fasa S tanpa DG.

Jam	Tegangan pada bus (p.u) Fasa S														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.983	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.995	0.973	0.998	0.997	0.988	0.997	0.974	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.996	0.977	0.996	0.996	0.98	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	1	0.996	0.976	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.979	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	1	0.996	0.973	0.998	0.998	0.988	0.997	0.976	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.994	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	1	0.993	0.965	0.995	0.995	0.972	0.995	0.969	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	1	0.993	0.966	0.996	0.996	0.973	0.995	0.977	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.968	0.996	0.996	0.976	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.967	0.996	0.996	0.974	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	0.996	0.996	0.971	0.995	0.977	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	0.995	0.995	0.964	0.995	0.974	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1	0.996	0.975	1	1	0.982	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.986	0.997	0.976	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.979	0.996	0.996	0.976	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.997	0.997	0.988	0.997	0.973	1	1	0.994	1	0.973

Tabel 4.10 Profile tegangan bus (p.u) fasa T tanpa DG.

Jam	Tegangan pada bus (V) Fasa T														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.983	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.995	0.973	0.998	0.997	0.988	0.997	0.974	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.996	0.977	0.996	0.996	0.98	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	1	0.996	0.976	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.979	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	1	0.996	0.973	0.998	0.998	0.988	0.997	0.976	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.994	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	1	0.993	0.965	0.995	0.995	0.972	0.995	0.969	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	1	0.993	0.966	0.996	0.996	0.973	0.995	0.977	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.968	0.996	0.996	0.976	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.967	0.996	0.996	0.974	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	0.996	0.996	0.971	0.995	0.977	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	0.995	0.995	0.964	0.995	0.974	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1	0.996	0.975	1	1	0.982	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.986	0.997	0.976	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.979	0.996	0.996	0.976	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.997	0.997	0.988	0.997	0.973	1	1	0.994	1	0.973

Tabel 4.11 menunjukkan rugi-rugi daya pada setiap perubahan beban dan besarnya keluaran daya dari Grid. Total beban setiap fasa selama 24 jam, fasa R adalah 485.7 MW, fasa S adalah 478.5 MW dan fasa T 478.5 MW. Daya yang dialirkan dari Grid ke fasa R sebesar 493.9 MW, ke fasa S sebesar 486.7 MW dan ke fasa T sebesar 486.7 MW. Sehingga total daya yang harus disuplai oleh grid utama untuk seluruh kebutuhan beban selama 24 jam sebesar 1467.3 MW.

Rugi-rugi daya saluran selama 24 jam, pada fasa R adalah 8.4 MW, pada fasa S adalah 8.4 MW dan fasa T adalah 8.4 MW. Total rugi-rugi daya pada sistem sebesar 25.2 MW. Hasil running power flow menunjukkan tegangan bus pada beberapa fasa besarnya sama disebabkan karena ketidak seimbangan beban yang tidak terlalu besar.

Tabel 4.11 Beban, Rugi-rugi dan Daya dari Main Grid sistem tanpa DG.

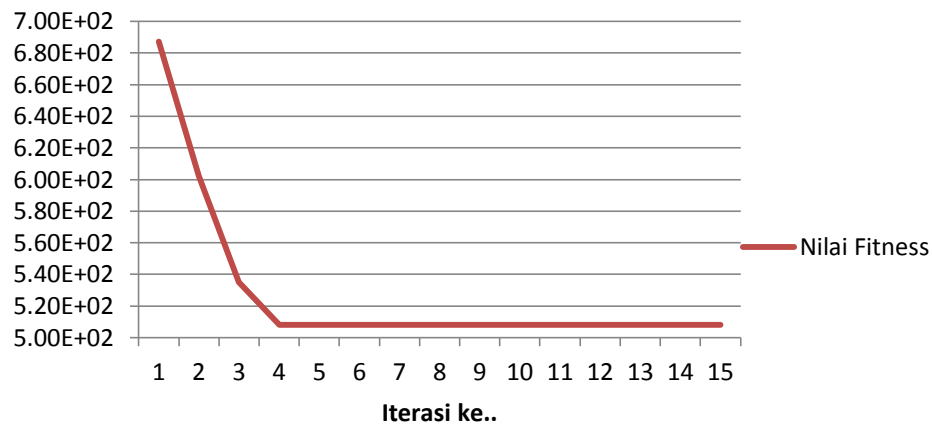
Jam	FASA R			FASA S			FASA T		
	Load (MW)	Loss (MW)	Gen (MW)	Load (MW)	Loss (MW)	Gen (MW)	Load (MW)	Loss (MW)	Gen (MW)
1	15.2	0.2	15.4	14.9	0.2	15.1	14.9	0.2	15.1
2	16.9	0.2	17.1	16.6	0.2	16.8	16.6	0.2	16.8
3	16.1	0.2	16.3	15.8	0.2	16	15.8	0.2	16
4	13.3	0.2	13.5	13	0.2	13.2	13	0.2	13.2
5	14.6	0.2	14.8	14.3	0.2	14.5	14.3	0.2	14.5
6	14.5	0.2	14.7	14.2	0.2	14.4	14.2	0.2	14.4
7	16.4	0.2	16.6	16.1	0.2	16.3	16.1	0.2	16.3
8	19.1	0.3	19.4	18.8	0.3	19.1	18.8	0.3	19.1
9	23.9	0.4	24.3	23.6	0.4	24	23.6	0.4	24
10	27.1	0.5	27.6	26.8	0.5	27.3	26.8	0.5	27.3
11	27.8	0.6	28.4	27.5	0.6	28.1	27.5	0.6	28.1
12	27.8	0.6	28.4	27.5	0.6	28.1	27.5	0.6	28.1
13	26.9	0.5	27.4	26.6	0.5	27.1	26.6	0.5	27.1
14	26.8	0.5	27.3	26.5	0.5	27	26.5	0.5	27
15	25.2	0.5	25.6	24.9	0.5	25.3	24.9	0.5	25.3
16	25.3	0.5	25.8	25	0.5	25.5	25	0.5	25.5
17	25.1	0.5	25.6	24.8	0.5	25.3	24.8	0.5	25.3
18	23	0.4	23.4	22.7	0.4	23.1	22.7	0.4	23.1
19	20.2	0.3	20.5	19.9	0.3	20.2	19.9	0.3	20.2
20	19.1	0.4	19.4	18.8	0.4	19.1	18.8	0.4	19.1
21	19	0.4	19.4	18.7	0.4	19.1	18.7	0.4	19.1
22	16.1	0.3	16.3	15.8	0.3	16	15.8	0.3	16
23	15.7	0.2	16	15.4	0.2	15.7	15.4	0.2	15.7
24	10.6	0.1	10.7	10.3	0.1	10.4	10.3	0.1	10.4
Total	485.7	8.4	493.9	478.5	8.4	486.7	478.5	8.4	486.7

Bedasarkan fungsi biaya untuk daya yang dialirkan dari Grid merupakan persamaan polinomial orde 2 (dua), dengan koefisien seperti pada tabel 4.4 maka biaya bahan bakar selama 24 jam untuk membangkitkan daya sebesar 1467.3 MW sebesar \$1594.838

Pembangkit PV dan WT adalah pembangkit yang tidak dapat diatur daya keluarannya. Daya yang dibangkitkan PV dan WT tergantung dari kondisi alam sekitarnya yaitu intensitas cahaya matahari untuk PV dan kecepatan angin untuk WT. Panel surya (PV) dipasang pada bus 2. Turbin angin (WT_1) pada bus 12 dan turbin angin (WT_2) pada bus 14. Pada simulasi ini, kedua pembangkit tersebut keluaran dayanya ditetapkan untuk setiap jamnya. PV membangkitkan daya antara jam ke 7 sampai jam ke 16. Baterai sebagai penyimpan energi dari pembangkit terbarukan. Baterai ditempatkan pada bus 3. Baterai akan menyalurkan atau menyerap daya berdasarkan kondisi beban. Baterai di charge pada beban yang rendah dan di discharge pada beban yang tinggi dengan kapasitas dan waktu charging 12 jam (antara pukul 1 s/d 7 dan 20 s/d 24) dan discharging selama 12 berikutnya dengan kapasitas charge dan discharge 1 MW. Dalam simulasi, dalam perhitungan aliran daya baterai berfungsi sebagai beban daya aktif bernilai positif pada saat charging dan bernilai negatif pada saat discharging.

Turbin mikro adalah pembangkit dengan bahan bakar gas atau biomass, dimana status *on/off* dan keluaran dayanya dapat diatur (*dispatchable*). Penjadwalan pembangkit dan pembebanan dilakukan pada turbin mikro (MT_3 dan MT_6). Turbin mikro (MT_3) ditempatkan pada bus 3 dan MT_6 ditempatkan pada bus 6. Kebutuhan daya pada beban disuplai oleh daya dari DG dan daya dari grid utama. Sehingga pengaturan pembebanan dilakukan pada turbin mikro dan *slack bus* pada grid utama akan mensuplai daya untuk memenuhi daya beban.

Simulasi dilakukan sampai iterasi yang ke 15. Dari grafik fungsi fitness gambar 4.4 dapat dilihat bahwa simulasi akan konvergen pada iterasi yang ke 4.



Gambar 4.4 Grafik fungsi fitness.

Dari hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.12 terlihat bahwa daya dari grid utama (pada bus 1) selalu mengalir ke beban. Grid ini berfungsi sebagai slack bus dalam perhitungan aliran daya. Dimana slack bus akan mensuplai kekurangan daya dari pembangkit lain untuk memenuhi kebutuhan daya beban.

Pada tabel 4.12 menunjukkan bahwa jam ke 1, 6-7, 12-13 turbin mikro pada bus 3 (MT_3) *off* (daya yang dibangkitkan 0 MW). Pada jam ke 1 beban pada fasa R, S dan T sebesar 15.2 MW, 14.9 MW dan 14.9 MW. Kebutuhan daya beban disuplai dari grid utama dan turbin mikro 6 (MT_6).

Pada jam ke 19-20 dan jam ke 24 turbin mikro pada bus 6 (MT_6) *off* (daya yang dibangkitkan 0 MW). Pada jam ke 19 beban pada fasa R, S dan T sebesar 20.2 MW, 19.9 MW dan 19.9 MW. Beban cukup tinggi, namun kebutuhan daya beban dapat terpenuhi dari daya yang dialirkan dari grid utama, baterai dan turbin angin (WT_1 dan WT_2).

Penjadwalan dan pembebanan pembangkit seluruh pembangkit, baterai dan daya dari grid utama pada fasa R, S dan T selama 24 jam dapat dilihat pada tabel 4.13 sampai dengan tabel 4.15.

Beban minimum fasa R, S dan T dari sistem ini terjadi pada jam ke 4 sebesar 13.3 MW, 13 MW dan 13 MW. Pada saat ini PV dan WT_1 dalam kondisi tidak membangkitkan daya. Kebutuhan daya beban disuplai dari grid utama, baterai, WT_2, MT_3 dan MT_4.

Tabel 4.12 Daya yang dibangkitkan oleh Turbin Mikro dan Grid.

Jam	GRID (MW)			MT_3 (MW)			MT_6 (MW)		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1	9.5	11.1	9.1	0	0	0	4.8	3	5
2	6.9	9.6	7.3	4.7	2.1	4	4.8	4.5	4.9
3	8	6.7	4.8	2.1	3	5	4.9	5	5
4	3.5	2.9	2.6	4.2	5	5	4.9	4.4	4.7
5	2.5	3.1	1.9	4.9	4.7	4.9	4.7	4	5
6	9	6.7	7.1	0	0	0	2.9	4.9	4.5
7	9.5	9.8	10.6	0	0	0	4.5	3.9	3
8	7.2	5.3	7.1	4.5	4.7	5	3	4.3	2.3
9	10.7	9.4	11.3	2.9	3.9	5	5	5	2
10	14	12.5	14.3	4	4.9	2.7	4	4.2	4.6
11	12	12.3	12	4.9	4.2	4.6	4.9	5	4.9
12	17	18.7	16.9	0	0	0	5	3	4.8
13	15.1	15.3	15.8	0	0	0	5	4.5	4
14	12.4	13.4	12.1	3	4.7	5	5	1.9	3
15	8.9	10.7	9	5	4.7	5	4.8	3	4.4
16	8.9	8.8	8.8	5	5	4.7	5	4.7	5
17	10.7	10.2	9	2.9	4	4.9	4.9	3.9	4.2
18	8.7	8.1	7.6	3.5	3.9	4.7	4.9	4.8	4.5
19	12.3	8.7	8.8	1.7	5	4.9	0	0	0
20	12.3	12.1	13	3.4	3.4	2.4	0	0	0
21	10.5	11.3	12.7	0	0	0	5	3.8	2.4
22	11	8	8.5	0	0	0	2.3	5	4.5
23	5	5.3	5.6	5	4.9	5	5	4.4	4
24	6.7	4.7	4.4	3	4.6	5	0	0	0

Tabel 4.13 Pembebanan Fasa R beban tidak seimbang

Jam	Load (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)
1	15.2	9.5	-1	0	0	2	0	4.8
2	16.9	6.9	-1	0	0	1.6	4.7	4.8
3	16.1	8	-1	0	0	2.2	2.1	4.9
4	13.3	3.5	-1	0	0	1.8	4.2	4.9
5	14.6	2.5	-1	0	2	1.6	4.9	4.7
6	14.5	9	-1	0	2	1.8	0	2.9
7	16.4	9.5	-1	0.1	2	1.6	0	4.5
8	19.1	7.2	1	0.3	2	1.4	4.5	3
9	23.9	10.7	1	0.4	3	1.2	2.9	5
10	27.1	14	1	0.6	3	1	4	4
11	27.8	12	1	0.7	4	0.8	4.9	4.9
12	27.8	17	1	0.7	4	0.6	0	5
13	26.9	15.1	1	0.6	5	0.6	0	5
14	26.8	12.4	1	0.4	5	0.4	3	5
15	25.2	8.9	1	0.3	5	0.6	5	4.8
16	25.3	8.9	1	0.1	5	0.8	5	5
17	25.1	10.7	1	0	5	1	2.9	4.9
18	23	8.7	1	0	4	1.2	3.5	4.9
19	20.2	12.3	1	0	4	1.4	1.7	0
20	19.1	12.3	-1	0	3	1.6	3.4	0
21	19	10.5	-1	0	3	1.8	0	5
22	16.1	11	-1	0	2	2	0	2.3
23	15.7	5	-1	0	0	2	5	5
24	10.6	6.7	-1	0	0	2	3	0

Beban minimum fasa R, S dan T dari sistem ini terjadi pada jam ke 4 sebesar 13.3 MW, 13 MW dan 13 MW. Pada saat ini PV dan WT_1 dalam kondisi tidak membangkitkan daya. Kebutuhan daya beban disuplai dari grid utama, baterai, WT_2, MT_3 dan MT_4.

Beban puncak fasa R, S dan T antara pukul 11-12 sebesar 27.8 MW, 27.5 MW dan 27.5 MW. Pada jam ke 10 semua pembangkit on, sedangkan pada jam ke 11 pembangkit MT_3, tetapi daya yang disalurkan dari grid utama meningkat, sehingga seluruh kebutuhan daya beban terpenuhi.

Tabel 4.14 Pembebanan Fasa S beban tidak seimbang

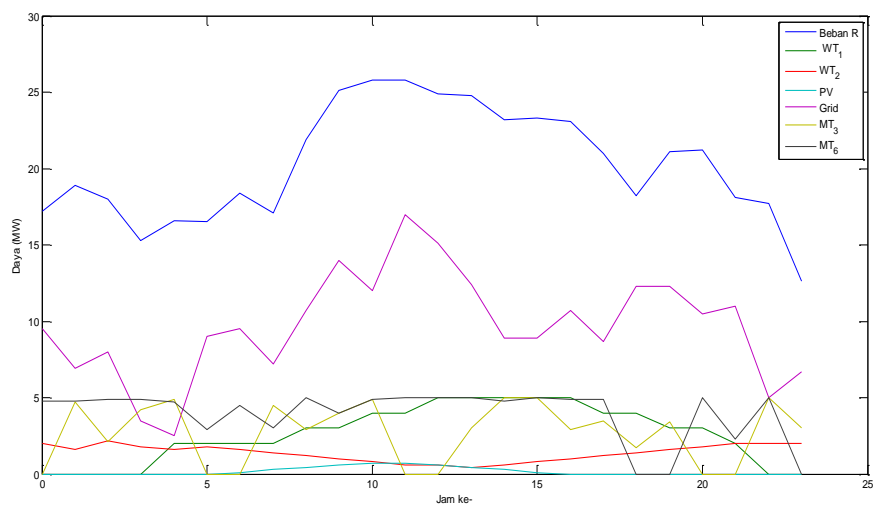
Jam	Load (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)
1	14.9	9.5	-1	0	0	2	0	4.8
2	16.6	6.9	-1	0	0	1.6	4.7	4.8
3	15.8	8	-1	0	0	2.2	2.1	4.9
4	13	3.5	-1	0	0	1.8	4.2	4.9
5	14.3	2.5	-1	0	2	1.6	4.9	4.7
6	14.2	9	-1	0	2	1.8	0	2.9
7	16.1	9.5	-1	0.1	2	1.6	0	4.5
8	18.8	7.2	1	0.3	2	1.4	4.5	3
9	23.6	10.7	1	0.4	3	1.2	2.9	5
10	26.8	14	1	0.6	3	1	4	4
11	27.5	12	1	0.7	4	0.8	4.9	4.9
12	27.5	17	1	0.7	4	0.6	0	5
13	26.6	15.1	1	0.6	5	0.6	0	5
14	26.5	12.4	1	0.4	5	0.4	3	5
15	24.9	8.9	1	0.3	5	0.6	5	4.8
16	25	8.9	1	0.1	5	0.8	5	5
17	24.8	10.7	1	0	5	1	2.9	4.9
18	22.7	8.7	1	0	4	1.2	3.5	4.9
19	19.9	12.3	1	0	4	1.4	1.7	0
20	18.8	12.3	-1	0	3	1.6	3.4	0
21	18.7	10.5	-1	0	3	1.8	0	5
22	15.8	11	-1	0	2	2	0	2.3
23	15.4	5	-1	0	0	2	5	5
24	10.3	6.7	-1	0	0	2	3	0

Dari tabel 4.13, 4.14 dan 4.15 terlihat bahwa daya yang disalurkan ke setiap fasa dan rugi-rugi daya memenuhi batasan keseimbangan daya $\sum_{i \in N} P_{kh} + \sum_{k \in G} P_k + P_{Bh} + P_G = P_D + P_{loss}$. Demikian juga batasan-batasan yang lain seperti P_{min} , P_{min} , *ramp rate*, *up time* (UT) dan *down time* (DT), terpenuhi. Gambar 4.5, 4.6 dan 4.7 menunjukkan besarnya beban pada fasa R,S dan T dan pembebanan masing-masing DG.

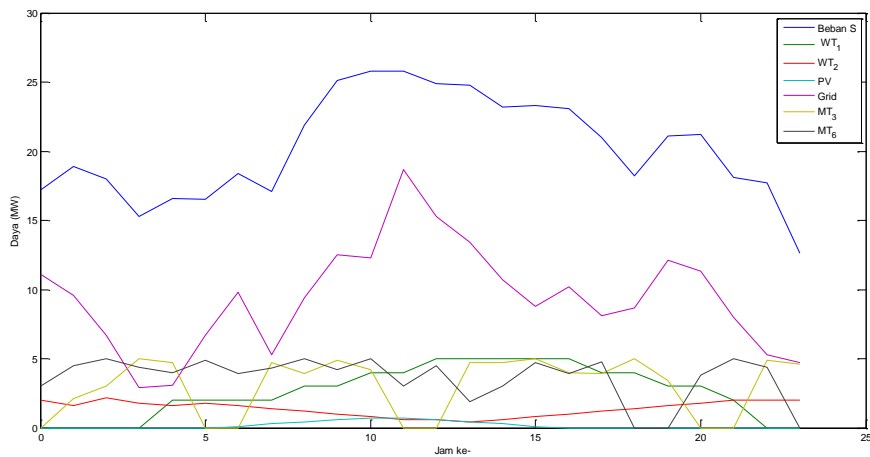
Dari hasil simulasi pada tabel 4.16, daya total yang dibangkitkan untuk melayani seluruh kebutuhan beban selama 24 sebesar 1442.7 MW. Total rugi daya sebesar 19.4 MW. Total daya yang harus dibangkitkan sebesar 1462.3 MW. Sehingga total biaya pembangkitan untuk daya dari Grid, MT_3, MT_6, biaya pembangkitan dari pembangkit terbarukan (PV, WT_1 dan WT_2) dengan fungsi biaya (*cost function*) seperti tabel 4.4 sebesar \$ 531.2724

Tabel 4.15 Pembebanan Fasa T beban tidak seimbang

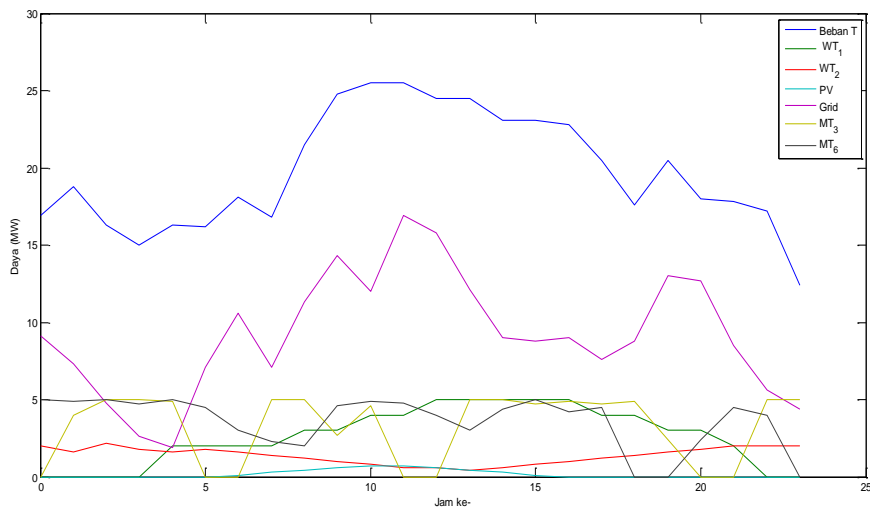
Jam	Load (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)
1	14.9	9.1	-1	0	0	2	0	5
2	16.6	7.3	-1	0	0	1.6	4	4.9
3	15.8	4.8	-1	0	0	2.2	5	5
4	13	2.6	-1	0	0	1.8	5	4.7
5	14.3	1.9	-1	0	2	1.6	4.9	5
6	14.2	7.1	-1	0	2	1.8	0	4.5
7	16.1	10.6	-1	0.1	2	1.6	0	3
8	18.8	7.1	1	0.3	2	1.4	5	2.3
9	23.6	11.3	1	0.4	3	1.2	5	2
10	26.8	14.3	1	0.6	3	1	2.7	4.6
11	27.5	12	1	0.7	4	0.8	4.6	4.9
12	27.5	16.9	1	0.7	4	0.6	0	4.8
13	26.6	15.8	1	0.6	5	0.6	0	4
14	26.5	12.1	1	0.4	5	0.4	5	3
15	24.9	9	1	0.3	5	0.6	5	4.4
16	25	8.8	1	0.1	5	0.8	4.7	5
17	24.8	9	1	0	5	1	4.9	4.2
18	22.7	7.6	1	0	4	1.2	4.7	4.5
19	19.9	8.8	1	0	4	1.4	4.9	0
20	18.8	13	-1	0	3	1.6	2.4	0
21	18.7	12.7	-1	0	3	1.8	0	2.4
22	15.8	8.5	-1	0	2	2	0	4.5
23	15.4	5.6	-1	0	0	2	5	4
24	10.3	4.4	-1	0	0	2	5	0



Gambar 4.5 Beban fasa R dan pembebanan Grid dan pembangkit.



Gambar 4.6 Beban fasa S dan pembebanan Grid dan pembangkit



Gambar 4.7 Beban fasa T dan pembebanan Grid dan pembangkit.

Dari perhitungan aliran daya, tegangan setiap bus dan rugi-rugi saluran dapat diketahui. Seperti yang telah disinggung di bab sebelumnya dan telah dibuktikan pada paper [4-12] bahwa pemasangan DG yang tepat pada saluran distribusi dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran dan meningkatkan profile tegangan. Pada tabel 4.11 terlihat bahwa tegangan pada setiap bus berada diantara $0.965 \leq V \leq 1 \text{ pu}$ sehingga memenuhi batasan, dimana tegangan yang diijinkan pada bus adalah $0.95 \leq V \leq 1.1 \text{ pu}$.

Pada tabel 4.17, 4.18 dan 4.19 adalah tabel tegangan setiap bus pada fasa R, S dan T hasil simulasi setelah DG dipasang. Pada beberapa bus akan terjadi

perbaikan tegangan. Salah satu contoh kenaikan tegangan seperti yang terlihat pada gambar 4.8 dimana menunjukkan grafik perbandingan tegangan pada bus 10 fasa R selama 24 jam.

Tabel 4.16 Beban, Rugi-rugi daya dan Daya yang dibangkitkan pada sistem dengan DG.

JAM	FASA R			FASA S			FASA T		
	Load (MW)	Loss (MW)	Gen (MW)	Load (MW)	Loss (MW)	Gen (MW)	Load (MW)	Loss (MW)	Gen (MW)
1	16.2	0.2	16.4	15.9	0.2	16.1	15.9	0.2	16.1
2	17.9	0.2	18.1	17.6	0.2	17.8	17.6	0.2	17.8
3	17.1	0.2	17.2	16.8	0.2	16.9	16.8	0.2	16.9
4	14.3	0.1	14.5	14	0.1	14.2	14	0.1	14.2
5	15.6	0.1	15.7	15.3	0.1	15.4	15.3	0.1	15.4
6	15.5	0.1	15.7	15.2	0.1	15.4	15.2	0.1	15.4
7	17.4	0.2	17.6	17.1	0.2	17.3	17.1	0.2	17.3
8	18.1	0.2	18.3	17.8	0.2	18	17.8	0.2	18
9	22.9	0.3	23.2	22.6	0.3	22.9	22.6	0.3	22.9
10	26.1	0.4	26.5	25.8	0.4	26.2	25.8	0.4	26.2
11	26.8	0.4	27.3	26.5	0.4	27	26.5	0.4	27
12	26.8	0.5	27.3	26.5	0.5	27	26.5	0.5	27
13	25.9	0.4	26.3	25.6	0.4	26	25.6	0.4	26
14	25.8	0.4	26.2	25.5	0.4	25.9	25.5	0.4	25.9
15	24.2	0.4	24.5	23.9	0.3	24.2	23.9	0.4	24.2
16	24.3	0.4	24.7	24	0.4	24.4	24	0.4	24.4
17	24.1	0.4	24.5	23.8	0.4	24.2	23.8	0.4	24.2
18	22.0	0.3	22.3	21.7	0.3	22	21.7	0.3	22
19	19.2	0.2	19.4	18.9	0.2	19.1	18.9	0.2	19.1
20	20.1	0.3	20.3	19.8	0.3	20.0	19.8	0.3	20.0
21	20.0	0.3	20.3	19.7	0.3	20.0	19.7	0.3	20.0
22	17.1	0.2	17.3	16.8	0.2	17.0	16.8	0.2	17.0
23	16.7	0.2	16.9	16.4	0.2	16.6	16.4	0.2	16.6
24	11.6	0.1	11.7	11.3	0.1	11.4	11.3	0.1	11.4
Total	485.7	6.5	492.2	478.5	6.4	485	478.5	6.5	485

Tabel 4.17 Profile tegangan bus (p.u) fasa R dengan DG, beban tidak seimbang

JAM	Bus pada fasa R														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	0.999	0.995	0.974	1	1	0.99	1	0.983	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.996	0.973	1	1	0.99	1	0.977	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	1	0.996	0.976	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	0.999	0.996	0.976	1	1	0.982	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	0.999	0.995	0.972	1	1	0.99	1	0.979	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.993	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	0.999	0.993	0.965	1	1	0.977	1	0.974	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	0.999	0.993	0.965	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.98	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.966	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.975	1	0.981	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	1	1	0.97	1	0.98	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1	0.996	0.974	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.986	0.997	0.976	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.998	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.98	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.998	0.998	0.988	0.997	0.974	1	1	0.994	1	0.973

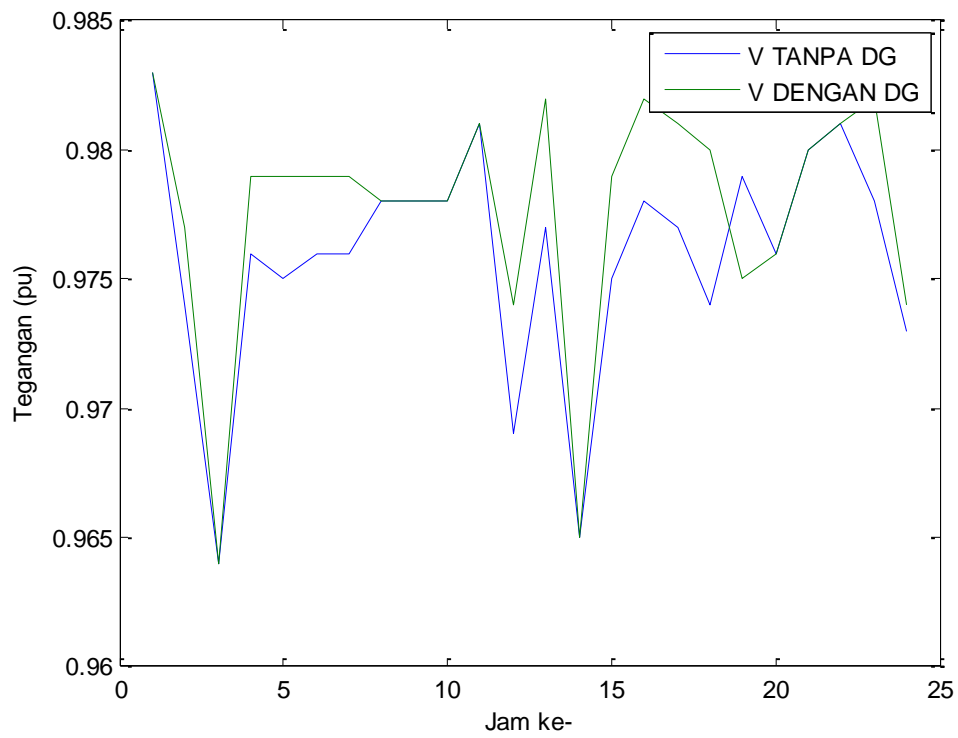
Gambar 4.6 menunjukkan perbandingan tegangan pada saat tidak dipasang DG dengan saat DG dipasang pada setiap bus fasa R, S dan T pada saat beban puncak (jam ke 12). Terlihat pada gambar terjadi kenaikan tegangan pada bus 6,7,8,9 dan 10. Namun pada bus 3 terjadi penurunan tegangan. Penurunan tegangan pada bus 3 disebabkan daya yang dialirkan dari grid menjadi lebih rendah. Tegangan yang paling rendah terjadi pada bus 10 pada jam yang ke 3 yaitu 0.964 pu.

Tabel 4.18 Profile tegangan bus (p.u) fasa S dengan DG, beban tidak seimbang

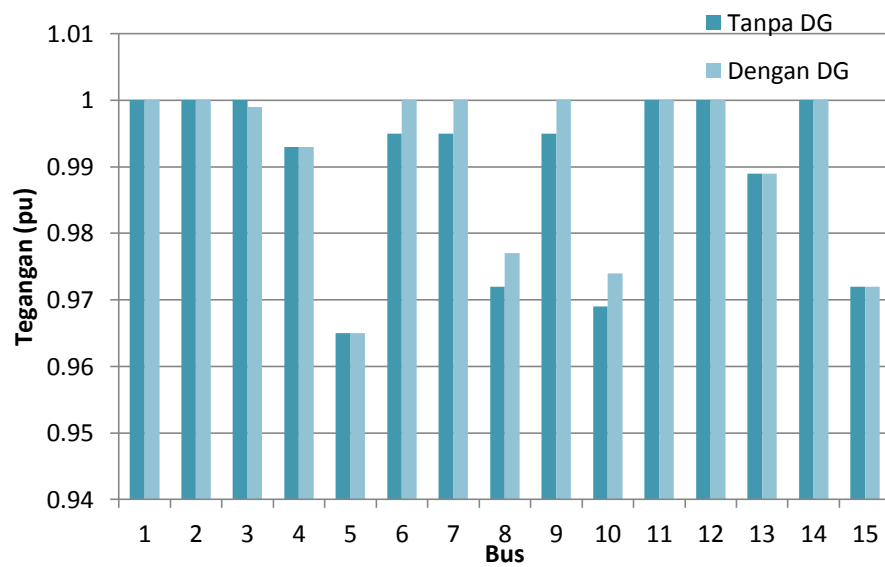
JAM	Bus pada fasa S														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	0.999	0.995	0.974	1	1	0.99	1	0.983	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.996	0.974	1	1	0.99	1	0.977	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	1	0.996	0.976	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	0.999	0.996	0.976	1	1	0.982	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	0.999	0.995	0.973	1	1	0.99	1	0.979	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.993	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	0.999	0.993	0.965	1	1	0.977	1	0.974	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	0.999	0.993	0.966	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.967	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.975	1	0.981	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	1	1	0.97	1	0.98	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1	0.996	0.974	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.986	0.997	0.976	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.998	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.98	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.998	0.998	0.988	0.997	0.974	1	1	0.994	1	0.973

Tabel 4.19 Profile tegangan bus (p.u) bus fasa T dengan DG, beban tidak seimbang

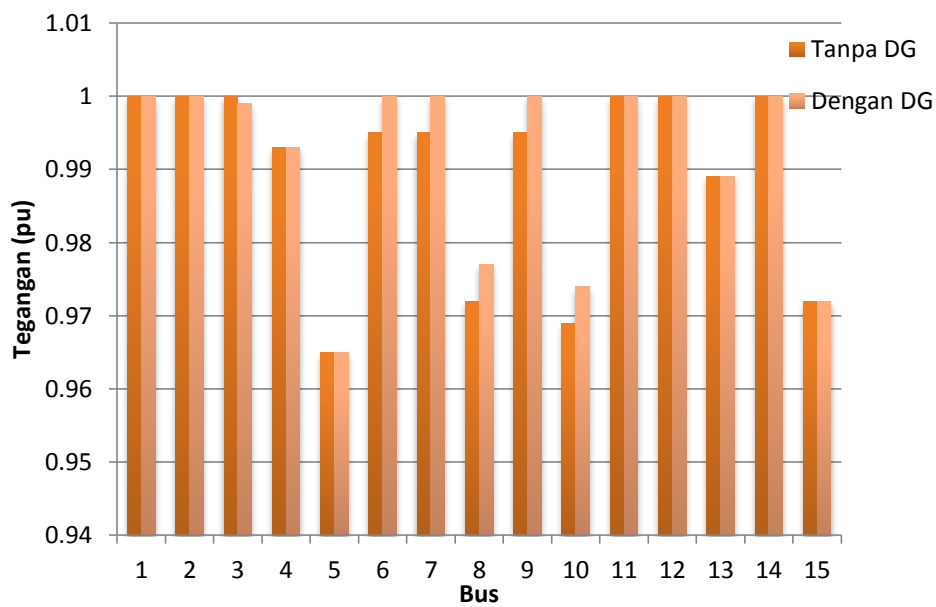
JAM	Bus pada fasa T														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	0.999	0.995	0.974	1	1	0.99	1	0.983	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.996	0.974	1	1	0.99	1	0.977	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	1	0.996	0.976	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	0.999	0.996	0.976	1	1	0.982	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	0.999	0.995	0.973	1	1	0.99	1	0.979	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.993	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	0.999	0.993	0.965	1	1	0.977	1	0.974	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	0.999	0.993	0.966	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.967	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.975	1	0.981	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	1	1	0.97	1	0.98	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1	0.996	0.974	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.986	0.997	0.976	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.998	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.98	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.998	0.998	0.988	0.997	0.974	1	1	0.994	1	0.973



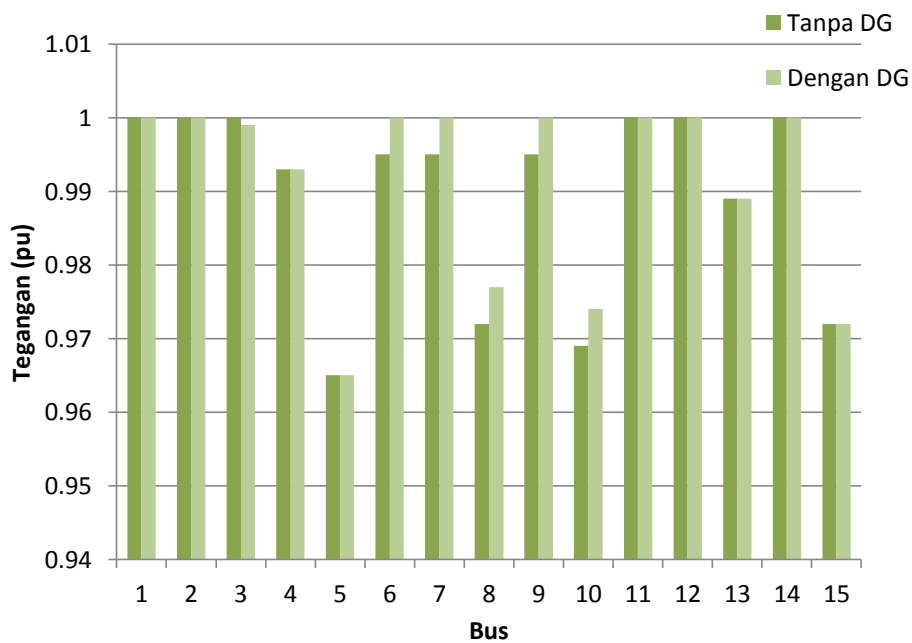
Gambar 4.8 Tegangan bus 10 fasa R.



Gambar 4.9 Tegangan bus fasa R saat beban puncak (jam ke 12)



Gambar 4.10 Tegangan bus fasa S saat beban puncak (jam ke 12)



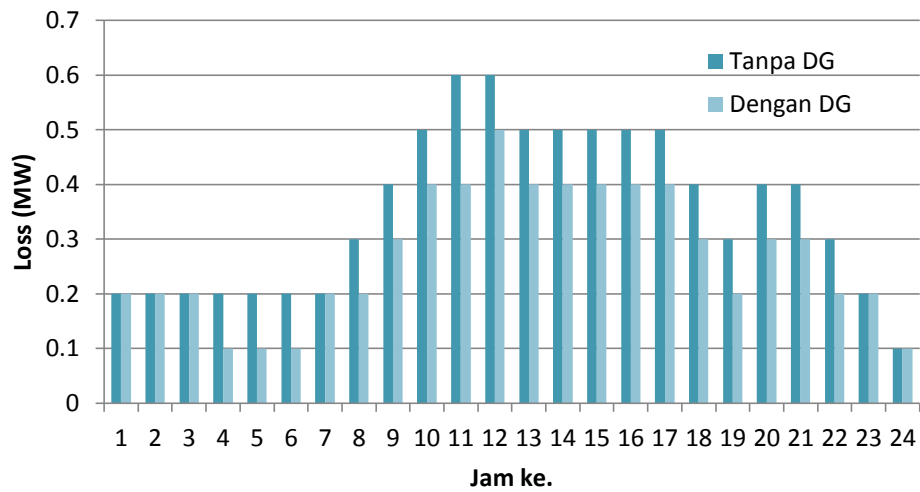
Gambar 4.11 Tegangan bus fasa T saat beban puncak (jam ke 12)

Tabel 4.20 Perbandingan rugi-rugi daya dengan DG dan tanpa DG.

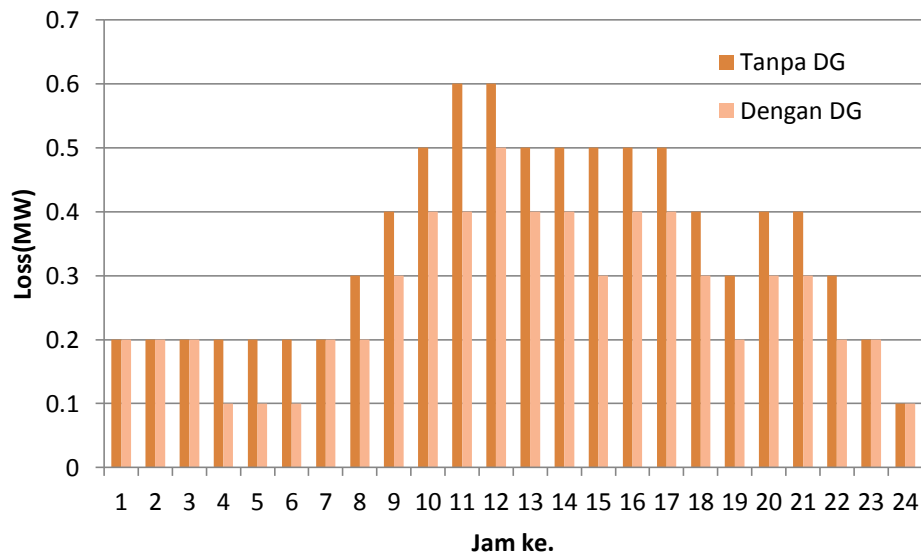
Jam	Fasa R		Fasa S		Fasa T	
	Loss tanpa DG (MW)	Loss dengan DG (MW)	Loss tanpa DG (MW)	Loss dengan DG (MW)	Loss tanpa DG (MW)	Loss dengan DG (MW)
1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
6	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
8	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
9	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
10	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4
11	0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4
12	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5
13	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4
14	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4
15	0.5	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4
16	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4
17	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4
18	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
19	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
20	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
21	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
22	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
23	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
24	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Total	8.4	6.5	8.4	6.4	8.4	6.5

Rugi daya pada sistem sebelum DG dipasang adalah sebagai berikut, pada fasa R sebesar 8,4 MW, pada fasa S sebesar 8.4 MW dan pada fasa T sebesar 8.4 MW. Sehingga total rugi daya pada sistem 25.2 MW. Total rugi-rugi daya setelah dipasang DG dan baterai menurun, dimana rugi-rugi pada fasa R sebesar 6,5 MW, pada fasa S sebesar 6,4 MW dan fasa T sebesar 6,5 MW. Total rugi-rugi pada sistem dengan DG adalah 19,4 MW. Perbandingan rugi-rugi daya fasa R, S dan T sebelum dan sesudah DG dipasang dapat dilihat pada table 4.20 dan

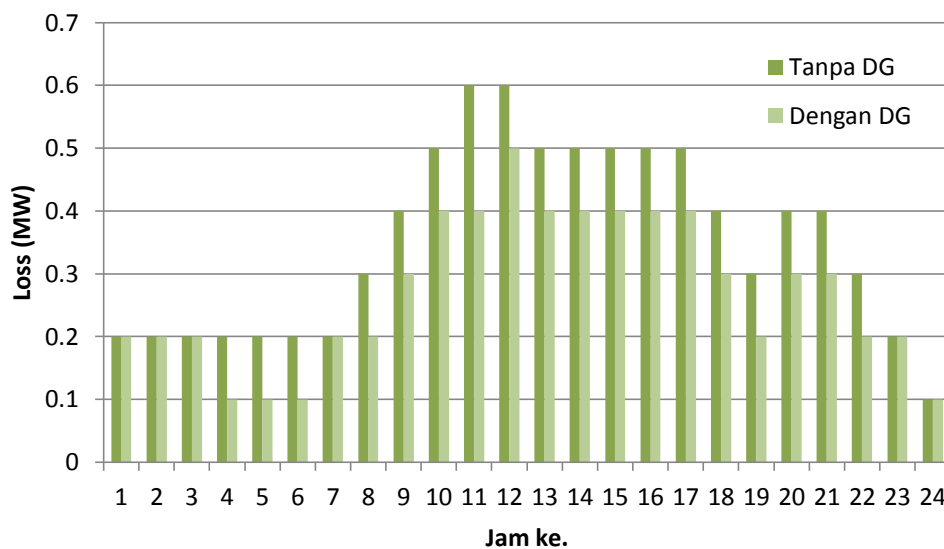
Gambar 4.12, 4.13 dan 4.14. Penurunan rugi daya terjadi karena terdapat pembangkit (DG) yang dipasang dekat dengan beban, sehingga daya listrik untuk memenuhi kebutuhan beban (dari DG) mengalir pada saluran yang lebih pendek .



Gambar 4.12 Rugi daya fasa R sebelum dan sesudah DG dipasang



Gambar 4.13 Rugi daya fasa S sebelum dan sesudah DG dipasang



Gambar 4.14 Rugi daya fasa T sebelum dan sesudah DG dipasang

Untuk melihat efektifitas simulasi yang dilakukan, penulis melakukan simulasi pada beban yang seimbang pada setiap fasanya. Total beban daya nyata pada setiap fasa selama 24 jam sebesar 480.9 MW. Total beban selama 24 jam 1442.7 MW. Hasil pembebanan setiap pembangkit (DG) dan grid utama dan rugi saluran ditampilkan pada tabel 4.21, tabel 4.22 dan tabel 4.23. Pada besar beban yang sama, daya aktif yang salurkan dari DG non renewable nilainya berbeda pada setiap fasanya. Hal ini disebabkan karena untuk mendapatkan daya dari DG non renewable dilakukan dengan menggunakan metode QEA untuk setiap fasanya. Dengan metode ini, daya yang dihasilkan menggunakan konsep probabilitas, namun tetap berada pada range daya minimum dan maksimum masing-masing DG. Daya keluaran dari grid utama menyesuaikan dengan kebutuhan beban dan daya yang dibangkitkan oleh DG. Total daya yang dibangkitkan selama 24 jam 1462.2 MW Total rugi daya pada beban seimbang selama 24 jam sebesar 19.5 MW. Sedangkan rugi daya pada beban yang tidak seimbang sebesar 19.4 MW. Terdapat perbedaan rugi daya yang tidak signifikan antara beban seimbang dengan beban yang tidak seimbang, karena fungsi tujuan dari simulasi ini adalah sama yaitu mendapat biaya pembangkitan yang paling murah pada beban yang sama. Total biaya pembangkitan pada beban yang seimbang sebesar \$ 502.6263

Tegangan setiap bus pada beban yang seimbang ditunjukkan pada tabel 4.24. Hasil simulasi menunjukkan tegangan bus sama untuk setiap fasanya. Gambar 4.15 perbandingan menunjukkan tegangan bus pada beban puncak (jam ke 12). Tegangan bus pada beban seimbang menunjukkan profile yang lebih baik.

Tabel 4.21 Pembebanan Fasa R beban seimbang

HOUR	LOAD (MW)	LOSS (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)
1	16	0.2	9.2	1	5	0	0	0	2
2	17.7	0.2	6.3	1	5	5	0	0	1.6
3	16.9	0.2	5.9	1	4	5	0	0	2.2
4	14.1	0.1	9.5	1	0	3	0	0	1.8
5	15.4	0.1	8.9	1	0	3	0	2	1.6
6	15.3	0.2	6.7	1	5	0	0	2	1.8
7	17.2	0.2	8.7	1	5	0	0.1	2	1.6
8	17.9	0.2	5	-1	4.7	4.7	0.3	2	1.4
9	22.7	0.3	8.9	-1	5	4.5	0.4	3	1.2
10	25.9	0.4	12.1	-1	4.7	4.9	0.6	3	1
11	26.6	0.4	11.6	-1	5	5	0.7	4	0.8
12	26.6	0.4	11.8	-1	5	5	0.7	4	0.6
13	25.7	0.4	10.9	-1	4	5	0.6	5	0.6
14	25.6	0.4	11.2	-1	5	4	0.4	5	0.4
15	24	0.4	10	-1	3.5	5	0.3	5	0.6
16	24.1	0.4	9	-1	5	4.6	0.1	5	0.8
17	23.9	0.4	8.5	-1	4.7	5	0	5	1
18	21.8	0.4	12	-1	5	0	0	4	1.2
19	19	0.2	8.8	-1	5	0	0	4	1.4
20	19.9	0.2	6.3	1	4.5	4.8	0	3	1.6
21	19.8	0.3	5.5	1	5	4.7	0	3	1.8
22	16.9	0.2	8	1	0	5	0	2	2
23	16.5	0.2	14.8	1	0	0	0	0	2
24	11.4	0.1	4.5	1	5	0	0	0	2

Tabel 4.22 Pembebanan Fasa S beban seimbang

HOUR	LOAD (MW)	LOSS (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)
1	16	0.2	9.2	1	5	0	0	0	2
2	17.7	0.2	7.9	1	4.9	3.5	0	0	1.6
3	16.9	0.2	4.9	1	5	5	0	0	2.2
4	14.1	0.1	7.5	1	0	5	0	0	1.8
5	15.4	0.1	6.9	1	0	5	0	2	1.6
6	15.3	0.2	6.7	1	5	0	0	2	1.8
7	17.2	0.2	8.7	1	5	0	0.1	2	1.6
8	17.9	0.2	4.5	-1	5	5	0.3	2	1.4
9	22.7	0.3	8.4	-1	5	5	0.4	3	1.2
10	25.9	0.4	11.9	-1	4.9	5	0.6	3	1
11	26.6	0.4	14.4	-1	3	4.2	0.7	4	0.8
12	26.6	0.4	11.8	-1	5	5	0.7	4	0.6

Tabel 4.22 Pembebanan Fasa S beban seimbang (lanjutan)

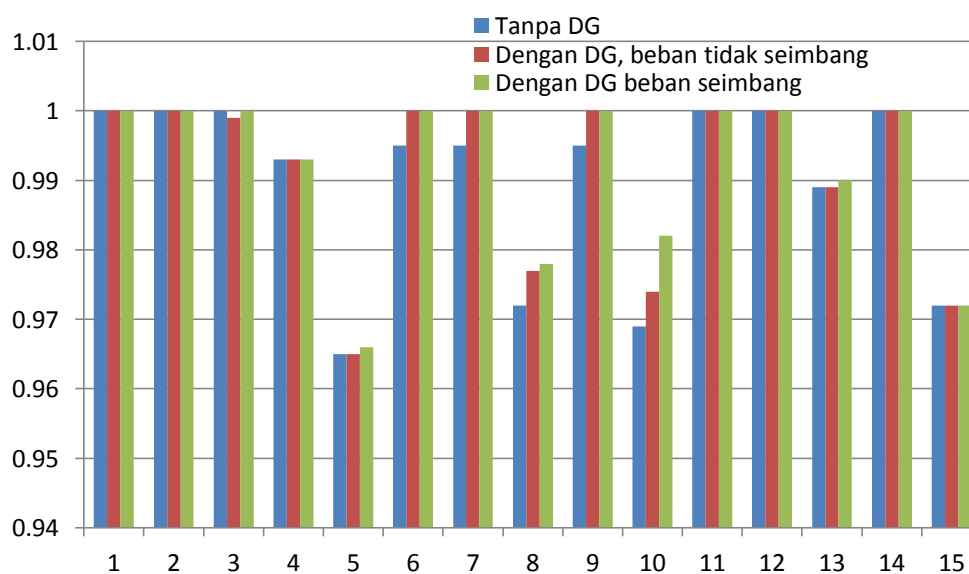
HOOR	LOAD (MW)	LOSS (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)
13	25.7	0.4	10	-1	5	4.9	0.6	5	0.6
14	25.6	0.4	12.2	-1	3	5	0.4	5	0.4
15	24	0.4	9.6	-1	4.9	4	0.3	5	0.6
16	24.1	0.4	8.9	-1	4.7	5	0.1	5	0.8
17	23.9	0.4	9.5	-1	3.7	5	0	5	1
18	21.8	0.4	12	-1	5	0	0	4	1.2
19	19	0.2	9.8	-1	4	0	0	4	1.4
20	19.9	0.2	5.5	1	5	5	0	3	1.6
21	19.8	0.3	5.4	1	4.9	4.9	0	3	1.8
22	16.9	0.2	8	1	0	5	0	2	2
23	16.5	0.2	14.8	1	0	0	0	0	2
24	11.4	0.1	4.5	1	5	0	0	0	2

Tabel 4.23 Pembebanan Fasa T beban seimbang.

Jam	LOAD (MW)	LOSS (MW)	Grid (MW)	Bat (MW)	MT_3 (MW)	MT_6 (MW)	PV (MW)	WT_1 (MW)	WT_2 (MW)
1	16	0.2	9.2	1	5	0	0	0	2
2	17.7	0.2	6.5	1	4.7	5	0	0	1.6
3	16.9	0.2	4.8	1	5	5	0	0	2.2
4	14.1	0.1	7.7	1	0	4.7	0	0	1.8
5	15.4	0.1	6.9	1	0	5	0	2	1.6
6	15.3	0.2	6.7	1	5	0	0	2	1.8
7	17.2	0.2	9.7	1	4	0	0.1	2	1.6
8	17.9	0.2	4.8	-1	4.9	4.7	0.3	2	1.4
9	22.7	0.3	10.4	-1	3	5	0.4	3	1.2
10	25.9	0.4	11.7	-1	5	5	0.6	3	1
11	26.6	0.4	11.6	-1	5	5	0.7	4	0.8
12	26.6	0.4	11.9	-1	5	4.9	0.7	4	0.6
13	25.7	0.4	12.4	-1	4.5	3	0.6	5	0.6
14	25.6	0.4	14.3	-1	3	2.9	0.4	5	0.4
15	24	0.4	10.5	-1	3	5	0.3	5	0.6
16	24.1	0.4	8.6	-1	5	5	0.1	5	0.8
17	23.9	0.4	8.3	-1	5	5	0	5	1
18	21.8	0.4	12	-1	5	0	0	4	1.2
19	19	0.2	8.8	-1	5	0	0	4	1.4
20	19.9	0.2	5.6	1	5	4.9	0	3	1.6
21	19.8	0.3	5.3	1	5	4.9	0	3	1.8
22	16.9	0.2	8	1	0	5	0	2	2
23	16.5	0.2	14.8	1	0	0	0	0	2
24	11.4	0.1	5	1	4.5	0	0	0	2

Tabel 4.24 Tegangan bus fasa R,S dan T pada beban seimbang.

JAM	Bus pada fasa T														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	0.996	0.975	0.998	0.998	0.988	0.998	0.981	1	1	0.994	1	0.973
2	1	1	1	0.996	0.974	1	1	0.99	1	0.977	1	1	0.992	1	0.974
3	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.984	0.999	0.964	1	1	0.993	1	0.973
4	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
5	1	1	0.999	0.996	0.976	1	1	0.983	1	0.979	1	1	0.994	1	0.973
6	1	1	1	0.997	0.977	0.997	0.997	0.979	0.996	0.976	1	1	0.994	1	0.973
7	1	1	1	0.996	0.973	0.998	0.998	0.988	0.997	0.976	1	1	0.993	1	0.973
8	1	1	1	0.995	0.972	1	1	0.98	1	0.978	1	1	0.994	1	0.973
9	1	1	1	0.994	0.969	1	1	0.978	1	0.978	1	1	0.991	1	0.972
10	1	1	1	0.993	0.966	1	1	0.977	1	0.978	1	1	0.99	1	0.972
11	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.973	1	0.981	1	1	0.988	1	0.972
12	1	1	1	0.993	0.965	1	1	0.977	1	0.974	1	1	0.989	1	0.972
13	1	1	1	0.993	0.966	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.99	1	0.972
14	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	0.999	0.965	1	1	0.99	1	0.965
15	1	1	1	0.994	0.968	1	1	0.98	1	0.979	1	1	0.99	1	0.971
16	1	1	1	0.993	0.967	1	1	0.978	1	0.982	1	1	0.991	1	0.973
17	1	1	1	0.994	0.967	1	1	0.975	1	0.981	1	1	0.992	1	0.972
18	1	1	1	0.995	0.97	0.995	0.995	0.964	0.995	0.974	1	1	0.993	1	0.971
19	1	1	1	0.996	0.974	0.996	0.996	0.979	0.996	0.975	1	1	0.99	1	0.971
20	1	1	1	0.997	0.977	1	1	0.989	1	0.979	1	1	0.987	1	0.971
21	1	1	1	0.997	0.979	1	1	0.973	1	0.98	1	1	0.991	1	0.93
22	1	1	1	0.997	0.978	1	1	0.977	1	0.981	1	1	0.991	1	0.972
23	1	1	1	0.997	0.978	0.996	0.996	0.976	0.996	0.978	1	1	0.991	1	0.973
24	1	1	1	0.997	0.979	0.998	0.998	0.988	0.997	0.974	1	1	0.994	1	0.973



Gambar 4.15 Tegangan bus fasa T saat beban puncak (jam ke 12)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.

Dari simulasi yang telah dilakukan untuk penjadwalan dan pembebanan optimum pembangkit terdistribusi (DG) yang terhubung pada sistem distribusi radial tidak seimbang, maka dapat disimpulkan:

1. Dengan mengatur penjadwalan dan pembebanan DG yang terhubung dengan sistem distribusi biaya pembangkitan yang termurah dapat dicapai.
2. DG yang ditempatkan pada sistem distribusi radial dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran.
3. Penempatan DG yang tepat pada saluran distribusi, dapat meningkatkan kualitas daya (*power quality*) dengan meningkatnya profile tegangan pada saat beban tinggi dengan tegangan berada $0.95 \leq V \leq 1.1 \text{ pu}$.
4. DG dapat meningkatkan keandalan sistem dengan tetap mengalirkan daya ke beban saat pembangkit utama (main grid) mengalami gangguan.

5.2 Saran.

Untuk mendapatkan perhitungan total biaya pembangkitan yang lebih akurat, penjadwalan dan pembebanan dapat dilakukan dengan memperhitungkan:

1. Ketidak pastian daya yang dibangkitkan dari PV dan wind turbine.
2. Perubahan daya dari baterai untuk setiap jamnya.
3. Memperhitungkan kapasitas saluran.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder , **Distributed generation: a definition**, Elsevier Electric Power System Research, 2001.
- [2] W. El-Khattam, M.M.A. Salama, **Distributed generation technologies, definitions and benefits**, Elsevier, Electric Power Systems Research 71 (2004).
- [3] Honghai Kuang, Shengqing Li, Zhengqiu Wu, **Discussion on advantages and disadvantages of distributed generation connected to the grid**, 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, IEEE Conferences.
- [4] Carmen L.T.Borges, Djalma M.Falcao, **Optimal distributed generation for reliability, losses and voltage improvement**. ELSEVIER Electrical Power and Energy System 28(1006) 4130-420, February 2006
- [5] Sudipta Ghosh, S.P. Ghoshal, Saradindu Ghosh, **Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system**, ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems (2010).
- [6] G.N.Koutroiumpezis, A.S.Safigianni, **Optimum allocation of the maximum possible distributed generation penetration in a distribution network**. ELSEVIER Electric Power System Research 80(2010) 1421- 1427, June 2010.
- [7] M.Sedighizadeh, A.Rezazadeh, **Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile**. World Academy of Science, Engineering and Technology 37 2008.
- [8] T. N. Shukla , S.P. Singh, K. B. Naik, **Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks**. International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 2, No. 3, 2010.

- [9] Celli G, Ghiani E, Mocci S, Pilo F. **A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation.** IEEE Trans Power Syst 2005.
- [10] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, Ashizawa T. **Application of tabu search to optimal placement of distributed generators.** IEEE PES Winter Meet 2001.
- [11] Ni Ketut Aryani, Muhammad Abdillah, I Made Yulistya Negara, Adi Soeprijanto, **Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation using Quantum Genetic Algorithm for Reducing Losses and Improving Voltage Profile,** TENCON 201.
- [12] Ni Ketut Aryani, Mat Syai'in, Adi soeprijanto, I Made Yulistya Negara, **Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation for Minimize Losses in Unbalance Radial Distribution Systems using Quantum Genetic Algorithm,** (International Review of Electrical Engineering /I.R.E.E Vol. 9 N.1 January – February 2014).
- [13] Hadi Saadat, **Power System Analysis,** McGraw-Hill, International Editions 1999.
- [14] Allen J. Wood, Bruce F.Wallenberg, **Power Generation, Operation and Control,** second edition, John Wiley & sons, Inc.
- [15] Jizhong Zhu, **Optimization of Power System Operation,** second edition, IEEE Press Wiley.
- [16] Mamdouh Abdel-Akher, Khalid Mohamed Nor, and Abdul Halim Abdul Rashid, **Improved Three-Phase Power-Flow Methods Using Sequence Components,** IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 20, NO. 3, AUGUST 2005.
- [17] Syafii, Khalid Mohamed Nor, Mamdouh Abdel-Akher , **Analysis of three phase distribution networks with distributed generation,** 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference IEEE Conferences
- [18] John G. Vlachogiannis and Kwang Y. Lee, **Economic Load Dispatch A Comparative Study on Heuristic Optimization Techniques With an Improved Coordinated Aggregation-Based PSO,** IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 24, May 2009.

- [19] Leandro dos Santos Coelho a,*, Chu-Sheng Lee b, **Electrical Power and Solving economic load dispatch problems in power systems using chaotic and Gaussian particle swarm optimization approaches**, Energy Systems 30 (2008) 297–307, ELSIVIER.
- [20] Hossein Shahinzadeh, Sayed Mohsen Nasr-Azadani, Nazereh Jannesari, , **Applications of Particle Swarm Optimization Algorithm to Solving the Economic Load Dispatch of Units in Power Systems with Valve-Point Effects**, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)
- [21] G.Sreenivasan, Dr. C.H.Saibabu, Dr.S.Sivanagaraju, **Solution of Dynamic Economic Load Dispatch (DELD) Problem with Valve Point Loading Effects and Ramp Rate Limits Using PSO**, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol.1, No.1, September 2011.
- [22] D. C. Walters; G. B. Sheble, **Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading**, IEEE Transactions on Power Systems, 1993, Vol: 8
- [23] Gwo-Ching Liao, **Using Chaotic Quantum Genetic Algorithm Solving Environmental Economic Dispatch of Smart Microgrid Containing Distributed Generation System Problems**, 2010 International Conference on Power System Technology.
- [24] Gwo-Ching Liao, **The optimal economic_dispatch of smart Microgrid including Distributed Generation**, 2013 International Symposium on Next-Generation Electronics.
- [25] John G. Vlachogiannis and Kwang Y. Lee, **Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Real and Reactive Power Dispatch**, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 23, NO. 4, NOVEMBER 2008.
- [26] Ni Ketut Aryani, Adi Soeprijanto , I Made Yulistya Negara, Mat Syai'in, **Economic Dispatch using Quantum Evolutionary Algorithm in Electrical Power System involving Distributed Generators**, Vol. 7, No. 5, October 2017, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) .

- [27] R. M. Burns and C. A. Gibson, **Optimization of priority lists for a unit commitment program**, in *Proc. IEEE/Power Engineering Society Summer Meeting, Paper A*, 1975, vol. 75, pp. 453–1.
- [28] W. L. Snyder Jr., H. D. Powell Jr., and J. C. Rayburn, **Dynamic programming approach to unit commitment**, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-2, pp. 339–350, May 1987.
- [29] P. G. Lowery, **Generation unit commitment by dynamic programming**, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, pp. 1218–1225, 1983.
- [30] C. K. Pang, G. B. Sheble, and F. Albuyeh, **Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitment**, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, no. 3, pp. 1212–1218, May 1981.
- [31] H. H. Balcı and J. F. Valenzuela, **Scheduling electric power generators using particle swarm optimization combined with the Lagrangian relaxation method**, *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 411–421, 2004.
- [32] F. Zhuang and F. D. Galiana, **Toward a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation**, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 763–770, May 1988.
- [33] J. A. Muckstadt and R. C. Wilson, **An application of mixed-integer programming duality to scheduling thermal generating systems**, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-87, pp. 1968–1978, 1968.
- [34] A. I. Cohen and M. Yoshimura, **A branch-and-bound algorithm for unit commitment**, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 2, pp. 444–451, 1983.
- [35] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, and V. Petridis, **A genetic algorithm solution to the unit commitment problem**, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 83–92, Feb. 1996.
- [36] P. C. Yang, H. T. Yang, and C.-L. Huang, **Solving the unit commitment problem with a genetic algorithm through a constraint satisfaction technique**, *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 37, pp. 55–65, 1996.

- [37] T. O. Ting, M. V. C. Rao, and C. K. Loo, **A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization**, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 411–418, Feb. 2006.
- [38] A.H.Mantawy; Y.L.Abdel-Magid; S.Z.Selim, **A simulated annealing algorithm for unit commitment**, *IEEE Transactions on Power Systems*, VoL. 13, 1998.
- [39] T. W. Lau, C. Y. Chung, K. P. Wong, T. S. Chung, and S. L. Ho, **Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm Approach for Unit Commitment**, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 24, NO. 3, AUGUST 2009
- [40] C. Y. Chung, Han Yu, and Kit Po Wong, **An Advanced Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Unit Commitment**, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 26, NO. 2, MAY 2011.
- [41] Bin Ji, Xiaohui Yuan , Xianshan Li , Yuehua Huang , Wenwu Li, **Application of quantum-inspired binary gravitational search algorithm for thermal unit commitment with wind power integration**, Elsevier, *Energy Conversion and Management* 87 (2014).
- [42] H.Z. Liang, H.B. Gooi, **Unit Commitment in Microgrids by Improved Genetic Algorithm**, *IEEE IPEC*, 2010 Conference Proceedings.
- [43] Xiong Wu, Xiuli Wang and Zhaohong Bie, **Optimal Generation Scheduling of a Microgrid**, 2012 3rd IEEE PES Inovative Smart Grid Thecnologies Europe(ISGT Europe) Berlin
- [44] T. Logenthiran, Dipti Srinivasan, **Short Term Generation Scheduling of a Microgrid**, *IEEE TENCON Region 10*, 2009.
- [45] Manisha Govardhan, Ranjit Roy, **Economic analysis of unit commitment with distributed energy resources**, *elsivier*, *Electrical Power and Energy Systems*, *Electrical Power and Energy Systems* 71 (2015).
- [46] Harun Or Rashid Howlader*, Hidehito Matayoshi, Tomonobu Senjyu, **Distributed generation integrated with thermal unit commitment**

- considering demand response for energy storage optimization of smart grid**, Elsevier, Renewable Energy 99 (2016).
- [47] John G. Vlachogiannis a,* , Jacob Østergaard, **Reactive power and voltage control based on general quantum genetic algorithms**, ELSEVIER , Expert Systems with Applications 36 (2009).
 - [48] Kuk-Hyun Han and Jong-Hwan Kim, **Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization**, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol 6, No. 6, December 2002.
 - [49] Han, K.-H., & Kim, J.-H. (2000). **Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem**. Proceedings of Congress on Evolutionary Computation.
 - [50] Han, K.-H., & Kim, J.-H. (2004). **Quantum-inspired evolutionary algorithms with a new termination criterion, He Gate, and two-phase scheme**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
 - [51] Hey, T. (1999). **Quantum computing: An introduction**. Computing and Control Engineering Journal.
 - [52] <http://www.indiasmartgrid.org/Distributed-Generation.php>
 - [53] https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system#/media/File:PV-system-schematics-residential-Eng.png
 - [54] <https://energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>
 - [55] <http://www.powermag.com/microturbine-technology-matures/>
 - [56] Farid Katireai, Reza Iravani, Nikos Hatziargyriou, Aris Dimeas, **Microgrids Management**, IEEE Power & Energy Magazine 2008.
 - [57] Granger Morgan, Jay Apt, Lester Lave. **The U.S. Electric Power Sector and Climate Change Mitigation**. Carnegie Mellon University 2005.
 - [58] YG Hegazy, MMA Salama, AY Chikhani. **Adequacy assessment of distributed generation systems using Monte Carlo simulation**. IEEE Transactions on Power Systems Vol.18, 2003.

LAMPIRAN
(Paper Penunjang Disertasi)

